

Д.Х.
ТЕСКИЙ ИНСТИ

УГ

ЭЛЕ

ПРОЦЕССЫ

В УСТАНОВКАХ

АВЛЯЕМЫМИ

РТУТНЫМИ ВЫН

ИТЕЛЯМИ

НКТП



СССР

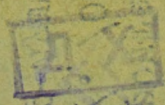
ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО

19

C.23805

2878-555
11/17-555



81

Проф. К. А. КРУГ

621.31

К84

17

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В УСТАНОВКАХ С УПРАВЛЯЕМЫМИ
РТУТНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

1944



НКТБ

КНИГОХРАНИЛИЩЕ

ОБЛ. БИБЛИОТЕКИ

СССР. СВЕРДЛОВСК

ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА ★ 1935 ★ ЛЕНИНГРАД

621.314.6

ИНДЕКС ЭЭ-35-5-4

Редактор А. Д. Смирнов.

Технический редактор С. В. Вишневский.

ПКК № 23. Цена 1 р. 70 к.

Сдано в производство 7/1 1935 г.

Подписано к печати с матриц 16/VI-1935 г.

Уполномоченный Главлита В-17277. Формат бумаги $72 \times 105/32$; $35/8$ печатн. листа по 74 240. Энергоредакция № 4. Заказ № 125.
Учетных л. 6,12 Гираж 2 000 экз.

Картотипография ГО УМС РККА. Ленинград, зд. Гл. Адмиралтейства.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	5
 I. Напряжения и токи во внешней цепи без учета перекрытия	
1. Схема без отсасывающей катушки	11
2. Схема с двухфазной отсасывающей катушкой	13
3. Схема с трехфазной отсасывающей катушкой	17
4. Разложение выпрямленного напряжения в тригонометрический ряд	20
5. Ток во внешней цепи	22

II. Напряжения и токи во внешней цепи с учетом перекрытия

6. Переход дуги с одного анода на другой при регулировании	26
7. Определение угла перекрытия при регулировании напряжения	30
8. Влияние перекрытия на форму кривой и на среднее значение выпрямленного напряжения при регулировании	34
9. Внешняя характеристика при регулировании с учетом перекрытия	43
10. Влияние перекрытия на гармоники выпрямленного напряжения	47
11. Гармоники тока во внешней цепи при учете перекрытия .	52

III. Напряжения и токи в отсасывающей катушке

12. Двухфазная отсасывающая катушка	57
13. Трехфазная отсасывающая катушка	63
14. Расчет двухфазной отсасывающей катушки	71
15. Расчет трехфазной отсасывающей катушки	75

IV. Анодные токи в обмотках трансформатора

16. Анодные токи	81
17. Токи в первичной обмотке трансформатора	85
18. Разложение тока в первичной обмотке трансформатора на высшие гармоники	87
19. Схемы соединения трансформаторов	97
20. Влияние высших гармоник в цепи выпрямленного тока на первичный ток в трансформаторе	100
21. Полный ток в первичной обмотке трансформатора	104
22. Расчетная мощность трансформатора	104
23. Токи в питающей сети и коэффициент мощности всей уста- новки	109

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе дается анализ напряжений и токов в выпрямительных установках с регулируемым напряжением при помощи управляемых сеток.

Несмотря на весьма большую литературу, существующую по ртутным выпрямителям (см. перечень литературы в конце книги А. Г. Белявского, Ртутные выпрямители переменного тока, Госэнергоиздат, 1932 г.), лишь очень немногие статьи посвящены детальному разбору сопротивлений, токов и напряжений на стороне переменного тока (на стороне первичной обмотки трансформатора) и на стороне выпрямленного постоянного тока и протеканию этих токов и напряжений в зависимости от времени.

Из работ, относящихся к указанному выше вопросу, можно отметить нижеследующие:

1. Dällenbach und Gereke, Strom und Spannungsverhältnisse der Gossleichrichter, „Archiv für Electrotechnik“, 1924, Heft 2.

2. Marcel Demontvignier, Méthode generale de calcul des redresseurs à vapeur de mercure, Revue Generale d'Electricité, 1924, pp. 492—499.

3. Marcel Demontvignier, Quelques propriétés des redresseurs à vapeur de mercure, Revue Generale d'Electricité, 1924, pp. 506—515.

Эти три статьи имеются в русском переводе в виде сборника под редакцией П. Л. Калантарова, Ленинград, Кубуч, 1929 г.

4. Marcel Demontvignier, Theorie des redresseurs à arc à commutation retardée, Revue Generale d'Electricité, 1932, pp. 625—634 et 659—667.

5. Kurt Müller und Erich Uhlmann, Strom und Spannungsverhältnisse in gittergesteuerten Gleichrichtern, „Archiv für Elektrotechnik“ № 5, 1933.

Из всех перечисленных статей особого внимания заслуживают две последние статьи, подробно и впервые рассматривающие влияние регулирования (при помощи сеток) и перекрытия анодов при разных режимах работы.

Автор пытался дать подробный математический анализ электромагнитных процессов, имеющих место в установках ртутных выпрямителей с регулированием напряжений посредством сеток, при помощи разложения кривых напряжений, получающихся в результате и регулирования и перекрытия, на высшие гармоники и нахождения по этим гармоникам составляющих тока. Для удобства чтения в начале статьи предпосылается несколько страниц, посвященных общезвестным основным уравнениям напряжений и токов в ртутных выпрямителях.

Из разнообразных схем соединений мы здесь остановимся на самых характерных: на схемах с шестианодными выпрямителями, питаемыми непосредственно от шестифазного (на вторичной стороне) трансформатора, без так называемой отсасывающей катушки, и на шестифазных схемах с двухфазной и трехфазной отсасывающими катушками.

Рассматривая обобщенную внешнюю цепь, мы будем предполагать, что она состоит из омического сопротивления, индуктивности и противо-э. д. с., как это мы, например, имеем в выпрямительных установках, работающих на электролитические ванны, в цепь которых включена дроссельная катушка для сглаживания колебаний напряжения и тока.

Потерю напряжения в дуге выпрямителя мы учтем тем, что включим ее в противо-э. д. с., увеличив последнюю на соответствующую величину (25—30 V).

Что касается трансформаторов и отсасывающих катушек, то мы будем учитывать лишь индуктивное падение напряжения. Омическим падением напряжения в трансформаторах и отсасывающих катушках мы пренебрегаем, ввиду того что падение напряжения практически не оказывает влияния на распределение токов. В случае желания его можно было бы учесть соответствующим увеличением сопротивления внешней цепи.

Падение напряжения и другие явления, имеющие место в результате так называемого перекрытия анодов, связанного известной длительностью перехода дуги с одного анода к следующему, и короткого замыкания через дугу за этот промежуток времени двух смежных фаз трансформатора, мы в первоначальной стадии расчетов во внимание принимать не будем. Затем в последующем мы учтем те изменения, которые вносятся перекрытием анодов.

Анализ явлений, имеющих место в электромагнитной системе ртутных выпрямительных установок с управляемыми сетками, мы будем проводить путем разложения кривых напряжений на соответствующие гармоники и определения по ним слагающих тока.

В дальнейшем мы будем пользоваться следующими обозначениями:

ωt — аргумент синусоидальной функции, зависящей от времени;

r и $x = \omega L$ — сопротивление и реактанс при нормальной частоте ($f = 50$ Hz) внешней цепи;

E — противо-э. д. с. внешней цепи;

r_2 и $x_2 = \omega L_S$ — сопротивление и реактанс одной (из шести фаз) вторичной обмотки трансформатора (§ 7);

r_k и x_k — сопротивление и реактанс короткого замыкания трансформатора, приведенные к одной фазе первичной обмотки (§ 7);

$x_0 = \omega L_0$ — реактанс (отношение напряжения к току при нормальной частоте) одной фазы отсасывающей катушки, когда ток в других фазах равен нулю;

x_a — приведенный реактанс эквивалентной цепи (§ 3, 4 и 11);

U_2 и $U_2 \sqrt{2}$ — эффективное значение и амплитуда вторичного напряжения одной фазы вторичной обмотки трансформатора;

e_1, e_2, e_3, \dots и i_1, i_2, i_3, \dots — мгновенные значения э. д. с. и токов в соответствующих фазах трансформатора;

E_m — амплитуда выпрямленного напряжения;

e и i — мгновенные значения выпрямленного напряжения и тока по отношению к внешней цепи;

α — угол регулирования;

γ — угол перекрытия;

$U_{ср0}$ — среднее значение выпрямленного напряжения, когда $\alpha = 0$;

$U_{ср}$ и U — среднее и эффективное значения выпрямленного напряжения, когда $\alpha \neq 0$;

$U_{вн}$ — среднее значение напряжения у клемм внешней сети при нагрузке;

$I_{ан}$ — эффективное значение анодного тока; $I_{ан}$ представляет собой также эффективное значение тока во вторичной обмотке трансформатора;

$U_2, U_3, U_k, \dots I_2, I_3, I_k$ — эффективные значения напряжений и токов гармоник соответствующих порядков;

U_1 и I_1 — эффективные значения напряжения и тока в первичной фазе трансформатора;

K — падение напряжения от перекрытия в долях $U_{ср0}$;

I_{cp} и I — среднее и эффективное значения выпрямленного тока во внешней цепи;

$I_{перв}$ — эффективное значение тока в первичной обмотке трансформатора;

I_{μ} — эффективное значение намагничивающего тока отсасывающей катушки;

A_k, A'_k, A''_k — значения амплитуд внешних гармоник кривых напряжения и их слагающих;

Q_k, M_k, N_k — отношения эффективных значений высших гармоник напряжения и их слагающих к наибольшему среднему напряжению;

δ — половина угла сдвига между э. д. с. двух смежных фаз;

β — отношение между падением напряжения от перекрытия и средним значением выпрямленного тока;

a — отношение эффективного значения тока в первичной обмотке трансформатора к среднему значению выпрямленного тока;

g — отношение эффективного значения анодного тока к среднему значению выпрямленного тока;

$\psi(\alpha, \beta)$ — функция, учитывающая влияние углов регулирования и перекрытия на отношение анодного тока к среднему значению выпрямленного тока;

$\xi_k(\alpha, \beta)$ — функция, определяющая относительное изменение эффективных значений высших гармоник тока в первичной обмотке трансформатора в зависимости от углов регулирования и перекрытия;

φ_1 — угол сдвига основной синусоиды первичного тока по отношению к синусоиде первичного напряжения;

$\epsilon_{пр}$ — коэффициент волнистости выпрямленного тока;

$\epsilon_{кат}$ — коэффициент волнистости тока в отсасывающей катушке;

p — эффективное значение основной синусоиды и всех гармоник кроме кратных трем в долях тока в первичной обмотке трансформатора в зависимости от углов регулирования и перекрытия;

q — эффективные значения гармоник, кратных трем, в долях тока в первичной обмотке трансформатора в зависимости от углов регулирования и перекрытия;

F, F' — коэффициенты мощности первичной обмотки трансформатора без учета и с учетом намагничивающего тока.

I. НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКИ ВО ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ БЕЗ УЧЕТА ПЕРЕКРЫТИЯ

1. СХЕМА БЕЗ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ КАТУШКИ

В схеме без отсасывающей катушки в предположении отсутствия перекрытия, т. е. в предположении мгновенного перехода дуги с одного анода на другой, всегда будет гореть лишь один анод.

Если в данный момент горит первый анод и e_1 — мгновенное значение э. д. с. этой фазы, то мы можем написать следующее уравнение равновесия э. д. с. и падения напряжений (фиг. 1):

$$e = e_1 = E + ir + L \frac{di}{dt} + L_s \frac{di}{dt},$$

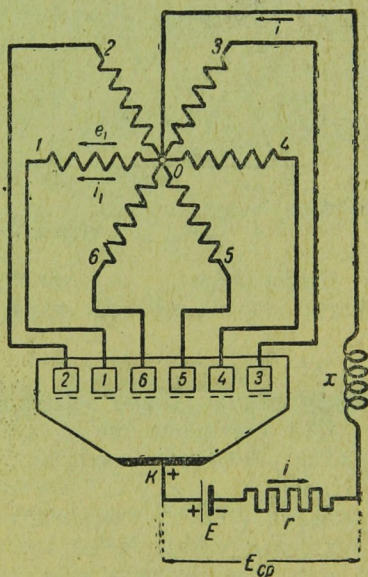
или, если вместо изменения времени t внести соответствующие изменения фазы $u = \omega t$, то индуктивности могут быть заменены реактанцами:

$$L \frac{di}{dt} = \omega L \frac{di}{d(\omega t)} = x \frac{di}{du},$$

$$L_s \frac{di}{dt} = \omega L_s \frac{di}{d(\omega t)} = x_s \frac{di}{du},$$

и уравнение принимает вид

$$e = e_1 = E + ir + (x + x_s) \frac{di}{du} = E + ir + x_a \frac{di}{du}, \quad (1)$$

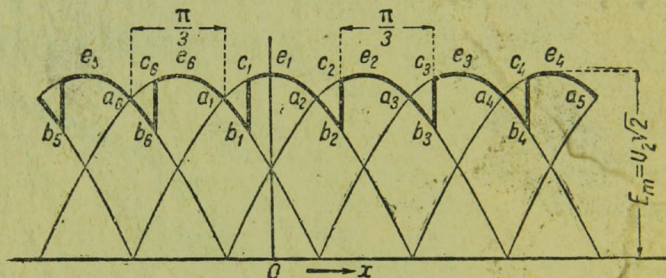


Фиг. 1. Шестифазная схема без отсасывающей катушки.

где

$$x_a = x + x_2. \quad (2)$$

При отсутствии регулирования и если не учитывать перекрытия, дуга будет переходить с одного анода на другой как раз в моменты, когда нарастающее напряжение последующей фазы сравнивается со спадающим напряжением предыдущей фазы, т. е. в моменты, соответствующие точкам a_1 , a_2 , a_3 пересечения синусоид e_6 и e_1 , e_1 и e_2 , e_2 и e_3 ... и т. д. (фиг. 2).



Фиг. 2. Кривая выпрямленного напряжения в схеме без отсасывающей катушки, $\gamma = 0$.

Получающаяся при этом кривая $a_1c_1a_2c_2a_3c_3 \dots$ выпрямленного напряжения состоит из симметричных отрезков a_1a_2 , a_2a_3 , a_3a_4 , ..., синусоид с угловой шириной $\frac{\pi}{3} = 60^\circ$ и имеет шестикратную периодичность ($f_6 = 6f = 300 \text{ Hz}$).

При регулировании с помощью сеток, т. е. когда сеткам анода сообщается положительный потенциал (позволяющий загореться дуге у соответствующего анода) с опозданием на фазовый угол α , то переход дуги с одного анода на другой будет задерживаться на тот же угол α . В результате кривая э. д. с., действующая в контуре, состоящем из внешней цепи и из той фазы, через которую в данный момент проходит ток, будет определяться кривой $b_1c_1a_2b_2c_2a_3b_3c_3 \dots$ и будет состоять из отрезков синусоид шириной (по оси абсцисс) также $\frac{\pi}{3} = 60^\circ$, но расположенных несимметрично относительно вершин синусоид.

При отсутствии отсасывающей катушки амплитуда выпрямленного напряжения равна амплитуде фазового напряжения:

$$E_m = U_2 \sqrt{2} = 1,414 U_2. \quad (3)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения определится как средняя ордината в пределах от $u = -\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right) = \alpha - \frac{\pi}{6}$

до $u = \frac{\pi}{6} + \alpha = \alpha + \frac{\pi}{6}$:

$$\begin{aligned} U_{cp} &= \frac{3}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6}} E_m \cos u \, du = \frac{3}{\pi} E_m \left| \sin u \right|_{\alpha - 30^\circ}^{\alpha + 30^\circ} = \\ &= \frac{3}{\pi} E_m [\sin(\alpha + 30^\circ) - \sin(\alpha - 30^\circ)] = \frac{3}{\pi} E_m \cos \alpha. \end{aligned}$$

Когда нет регулирования, $\alpha = 0$, то среднее значение выпрямленного напряжения будет

$$U_{cp0} = \frac{3}{\pi} E_m = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 1,35 U_2. \quad (4)$$

При регулировании

$$U_{cp} = 1,35 U_2 \cos \alpha = U_{cp0} \cos \alpha. \quad (5)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения пропорционально косинусу угла регулирования.

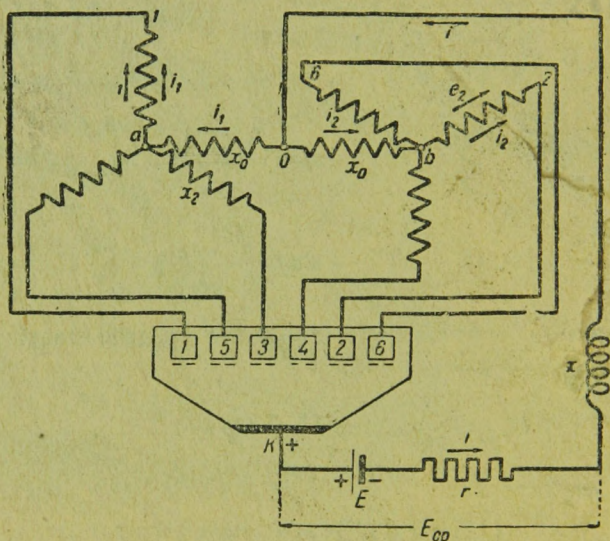
Предельное значение угла α , при котором мгновенное значение действующего в цепи напряжения не спадает до нуля, равно 60° .

При углах больше 60° , поскольку индуктивность не задерживает тока, ток в цепи может прерываться.

2. СХЕМА С ДВУХФАЗНОЙ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ КАТУШКОЙ

Для того чтобы удлинить время горения каждого отдельного анода, можно по предложению Kübler'a разбить шесть

фаз вторичной обмотки на две трехфазных группы, сдвинутые на 60° , и соединить нулевые точки этих двух систем через так называемый отсасывающий трансформатор или отсасывающую катушку (фиг. 3). При такой схеме каждая трехфазная группа 1, 3, 5 и 2, 4, 6 будет работать независимо одна от другой, одновременно будут гореть всегда два ано-



Фиг. 3. Схема с двухфазной отсасывающей катушкой.

да: 1 и 2 или 2 и 3 и т. д., и каждый анод при отсутствии перекрытия будет гореть в течение одной трети основного периода.

Положим, что в данный момент горят аноды 1 и 2 ($i = i_1 + i_2$). Напишем уравнение равновесия напряжений для цепей $a1KrxOa$ и $b2KrxOb$. Реактанс одной фазы двухфазной отсасывающей катушки (когда ток в другой фазе равен нулю) мы обозначаем через x_0 . Взаимный реактанс мы можем принять также равным x_0 , так как обе обмотки отса-

сывающей катушки связаны общим магнитным потоком

$$\begin{aligned} e_1 &= E + ir + x \frac{di}{du} + x_0 \frac{di_1}{du} - x_0 \frac{di_2}{du} + x_2 \frac{di_1}{du} = \\ &= E + ir + x \frac{di}{du} + x_2 \frac{di_1}{du} + 2x_0 \frac{d}{du} (2i_1 - i), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} e_2 &= E + ir + x \frac{di}{du} + x_0 \frac{di_2}{du} - x_0 \frac{di_1}{du} + x_2 \frac{di_2}{du} = \\ &= E + ir + x \frac{di}{du} + x_2 \frac{di_2}{du} + 2x_0 \frac{d}{du} (2i_2 - i). \end{aligned} \quad (7)$$

Если мы возьмем полусумму последних двух уравнений, то получим уравнение

$$\begin{aligned} e &= \frac{e_1 + e_2}{2} = E + ir + (x + 0,5x_2) \frac{di}{du} = \\ &= E + ir + x_a \frac{di}{du}, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$x_a = x + 0,5x_2, \quad (9)$$

которое совпадает с уравнением (1), полученным выше для шестифазной (двойной) звезды без отсасывающей катушки, с той разницей, что напряжение, действующее в системе, состоящей из внешней цепи и двух фаз (1 и 2), параллельно включенных через дугу в ртутнике, будет равно полусумме мгновенных значений э. д. с. тех двух фаз, которые горят в данный момент. Кроме того, поскольку выпрямленный ток составляется из двух токов, протекающих через две параллельные вторичные фазы трансформатора, в последнем уравнении реактанц рассеяния трансформатора входит в половинном размере.

Величина реактанца отсасывающей катушки в уравнение не входит, величина его не влияет на величину тока во внешней цепи.

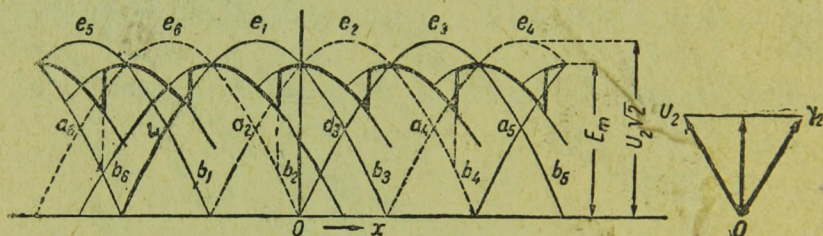
Если бы работала одна левая трехфазная система 1, 3, 5, то при отсутствии регулирования, $\alpha = 0$, и перекрытия выпрямленное напряжение изменялось бы по кривой $a_1 e_1 a_3 e_3 a_5 \dots$, а

если бы работала одна правая система 2, 4, 6, — по кривой $a, a_4, a_6, a_8 \dots$ (фиг. 4).

Отсасывающая катушка выравнивает эти напряжения, деля разность между ними пополам. Мы получаем в результате кривую шестикратной периодичности, состоящую из отрезков синусоид, амплитуда которых будет

$$E_m = U_2 \sqrt{2} \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{6}}{2} U_2 = 1,225 U_2, \quad (10)$$

где U_2 — напряжение одной фазы трансформатора.



Фиг. 4. Кривая выпрямленного напряжения в схеме с двухфазной катушкой, $\gamma = 0$.

При регулировании на угол α переход дуги с первого анода на третий, со второго на четвертый и т. д. будет происходить не в точках пересечения синусоид, а на угол α позднее.

Вследствие этого кривая выпрямленного напряжения будет состоять из отрезков синусоид шириной в $\frac{\pi}{3} = 60^\circ$, сдвинутых относительно линии симметрии OA на угол α .

Мы получаем такую же кривую выпрямленного напряжения, как и без отсасывающей катушки, но с меньшим значением амплитуды [ср. формулы (10) и (3)].

Среднее значение выпрямленного напряжения при отсутствии регулирования, $\alpha = 0$, будет равно

$$U_{cp0} = \frac{3}{\pi} E_m = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 = 1,17 U_2, \quad (11)$$

а при регулировании на угол α

$$U_{cp} = 1,17 U_2 \cos \alpha = U_{cp0} \cos \alpha \quad (12)$$

3. СХЕМА С ТРЕХФАЗНОЙ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ КАТУШКОЙ

Трехфазная отсасывающая катушка удлиняет время горения анодов в еще большей степени, чем двухфазная катушка. Включенная своими концами a , b и c к точкам соединения противоположных фаз 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 (фиг. 5), трехфазная катушка разбивает работу ртутника как бы на три двухфазных выпрямителя: 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6. При этом длительность горения дуги у одного анода без учета перекрытия будет равна половине (основного) периода, и одновременно будут гореть всегда три анода: 1, 2 и 3 или 2, 3 и 4 и т. д.

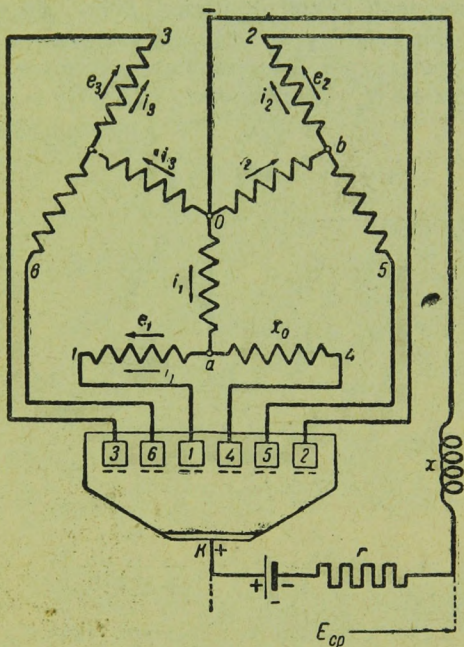
Трехфазная катушка выравнивает потенциалы точек a , b и c . Включение такой катушки, удлиняя время горения дуг, в то же время снижает значение выпрямленного напряжения, как мы уви-

дим дальше, еще в большей мере, чем двухфазная катушка.

Ток во внешней цепи равен сумме токов трех горящих одновременно анодов. Положим, что в данный момент горят аноды 1, 2 и 3, тогда мгновенное значение тока во внешней цепи выразится через

$$i = i_1 + i_2 + i_3, \quad (13)$$

мгновенные значения э. д. с. соответствующих фаз пусть будут e_1 , e_2 и e_3 .



Фиг. 5. Схема с трехфазной отсасывающей катушкой.

Если x_0 — реактанс при $f=50$ Hz одной фазы трехфазной отсасывающей катушки, когда ток в других фазах равен нулю, то, так как магнитный поток, возбуждаемый током в одной фазе при отсутствии тока в двух других фазах, делится пополам между стержнями этих двух других фаз, взаимный реактанс одной фазы на другую будет равен $0,5x_0$.

Напишем уравнение равновесия напряжений для трех контуров, через которые в данный момент проходит ток, а именно для контуров $a1KrxOa$, $b2KrxOb$ и $c3KrxOc$:

$$e_1 = E + ir + x \frac{di}{du} + x_0 \frac{di_1}{du} - 0,5x_0 \frac{di_2}{du} - 0,5x_0 \frac{di_3}{du} + x_2 \frac{di_1}{du};$$

произведя замену

$$i_1 - \frac{i_2 + i_3}{2} = \frac{3i_1 - i}{2},$$

мы получим уравнение

$$e_1 = E + ir + x \frac{di}{du} + x_2 \frac{di_1}{du} + 0,5x_0 \frac{d}{du} (3i_1 - i) \quad (14)$$

и аналогично

$$e_2 = E + ir + x \frac{di}{du} + x_2 \frac{di_2}{du} + 0,5x_0 \frac{d}{du} (3i_2 - i), \quad (15)$$

$$e_3 = E + ir + x \frac{di}{du} + x_3 \frac{di_3}{du} + 0,5x_0 \frac{d}{du} (3i_3 - i). \quad (16)$$

Если сложить эти три уравнения и сумму разделить на 3:

$$\begin{aligned} e = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{3} &= E + ir + \left(x + \frac{x_2}{3} \right) \frac{di}{du} = \\ &= E + ir + x_a \frac{di}{du}, \end{aligned} \quad (17)$$

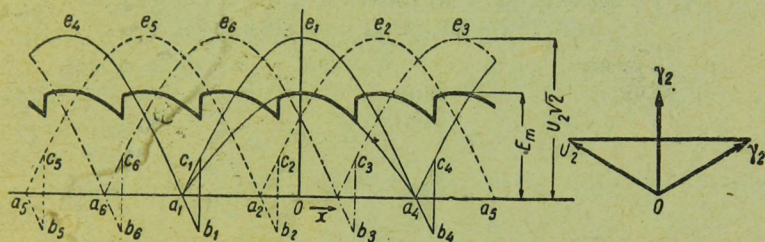
где

$$x_a = x + \frac{x_2}{3}, \quad (18)$$

то мы получаем уравнение, тождественное с уравнениями (1) и (8), с той лишь разницей, что мгновенное значение вы-

прямленного напряжения будет равно среднему арифметическому мгновенных значений э. д. с. трех фаз, через которые в данный момент проходит ток, и что реактанц трансформатора входит в размере одной трети своей величины. Величина реактанца отсасывающей катушки не влияет на значение тока во внешней цепи.

Среднее арифметическое э. д. с. трех горящих фаз будет определяться кривой шестикратной периодичности $f_6 = 6f =$



Фиг. 6. Кривая выпрямленного напряжения в схеме с трехфазной катушкой, $\gamma = 0$.

$= 300 \text{ Hz}$, состоящей из отрезков синусоид с амплитудами (фиг. 6)

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{U_2 \sqrt{2} + 2U_2 \sqrt{2} \cos 60^\circ}{3} = \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{3} U_2 = 0,943 U_2. \end{aligned} \quad (19)$$

При отсутствии регулирования и без учета перекрытия дуги будут перескакивать с четвертого анода на первый, с пятого на второй, с шестого на третий и т. д. в моменты, соответствующие точкам a_1, a_2, a_3 .

При регулировании на угол α дуги будут перескакивать с одного анода на другой позднее на угол α в точках b_1, b_2, b_3 и т. д., и в соответствии с этим кривая выпрямленного напряжения будет состоять из отрезков синусоид, смещенных относительно линии симметрии также на угол α .

Применяя полученные выше выводы, мы можем написать, что среднее значение выпрямленного напряжения при отсут-

ствии регулирования будет

$$U_{cp0} = \frac{3}{\pi} E_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,9 U_2, \quad (20)$$

а среднее напряжение при регулировании на угол α

$$U_{cp} = 0,9 U_2 \cos \alpha = U_{cp0} \cos \alpha. \quad (21)$$

4. РАЗЛОЖЕНИЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЙ РЯД

Кривая выпрямленного напряжения (при оси ординат, проходящей через вершину синусоиды), определяется уравнением

$$e = f(u) = E_m \cos u, \quad (22)$$

имеющим силу в пределах от $u = -\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right) = \alpha - \frac{\pi}{6}$

до $u = \alpha + \frac{\pi}{6}$, или от $u = \alpha - 30^\circ$ до $u = \alpha + 30^\circ$.

Согласно известному методу разложения периодических функций в ряд Фурье амплитуда A_k и фазовый угол ϕ_k гармоники порядка k могут быть вычислены на основе следующих уравнений¹:

$$\begin{aligned} & \left(k = 6, 12, 18, \dots \text{ и } \frac{k\pi}{6} \equiv \frac{k}{6} 180^\circ \right) \\ & A'_k = A_k \sin \phi_k = 2 \cdot \frac{3}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6}} E_m \cos u \cos ku \, du = \\ & = \frac{3}{\pi} E_m \left[\frac{\sin(k-1)u}{k-1} + \frac{\sin(k+1)u}{k+1} \right]_{\alpha - 30^\circ}^{\alpha + 30^\circ} = \\ & = (-1)^{\frac{k}{6}} U_{cp0} \left[\frac{\cos(k-1)\alpha}{k-1} - \frac{\cos(k+1)\alpha}{k+1} \right] = \\ & = M_k U_{cp0}, \end{aligned} \quad (23)$$

¹ См. К. Круг, Основы электротехники, т. II, 1932, стр. 210.

$$\begin{aligned}
A_k'' &= A_k \cos \phi_k = 2 \cdot \frac{3}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6}} E_m \cos u \sin ku \, du = \\
&= \frac{3}{\pi} E_m \left| \frac{\cos(k-1)u}{k-1} + \frac{\cos(k+1)u}{k+1} \right|_{\alpha - 30^\circ}^{\alpha + 30^\circ} = \\
&= (-1)^{\frac{k}{6}} U_{cp0} \left[\frac{\sin(k-1)\alpha}{k-1} - \frac{\sin(k+1)\alpha}{k+1} \right] = \\
&= N_k U_{cp0}.
\end{aligned} \tag{24}$$

Действующие значения искоемых гармоник будут равны

$$\begin{aligned}
U_k &= \frac{A_k}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{M_k^2 + N_k^2}{2}} U_{cp0} = \\
&= \frac{\sqrt{2} \sqrt{k^2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}}{k^2 - 1} U_{cp0}.
\end{aligned} \tag{25}$$

На фиг. 7 представлены в виде кривых эффективные значения гармоник разных порядков в процентах наибольшего выпрямленного напряжения U_{cp0} в зависимости от угла регулирования α° .

При вычислениях удобнее бывает определять не амплитуды, а эффективные значения гармоник и выражать их не через максимальное значение выпрямленного напряжения U_{cp0} , а через среднее значение $U_{cp} = U_{cp0} \cos \alpha$, тогда эффективное значение гармоники напряжения порядка k ($k=6, 12, 18, \dots$) выразится через

$$U_k = \frac{A_k}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2(k^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1)}}{k^2 - 1} U_{cp} = Q_k U_{cp}. \tag{26}$$

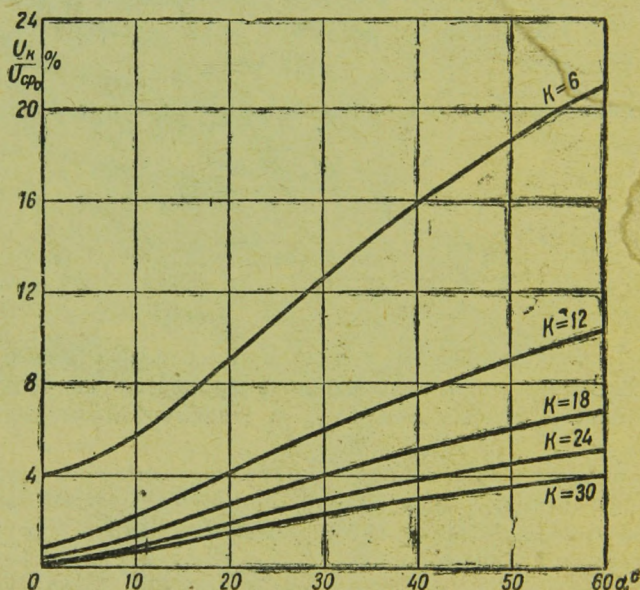
Действующие значения гармоник разного порядка в процентах от U_{cp0} и в зависимости от степени регулиро-

вания, т. е. от отношения

$$100 \frac{U_{cp}}{U_{cp0}} = 100 \cos \alpha \quad (27)$$

представлены на фиг. 8.

Как мы видим, значения гармоник при регулировании возрастают весьма быстро как по своей абсолютной величине, так, в особенности, и по своей относительной величине к данному среднему значению выпрямленного напряжения.



Фиг. 7. Эффективные значения высших гармоник U_k в процентах от максимального выпрямленного напряжения U_{cp0} в зависимости от угла регулирования α .

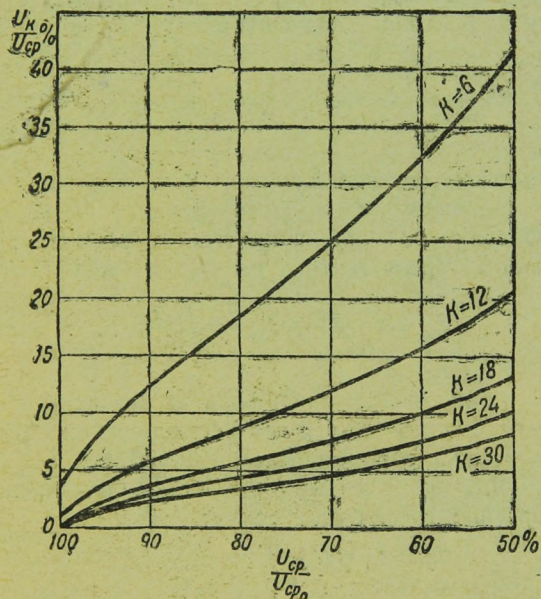
5. ТОК ВО ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ

По закону суперпозиции ток, проходящий через данную цепь, может быть определен как сумма токов, получающихся от действия отдельных слагающих напряжений.

Поэтому, зная слагающие выпрямленного напряжения, мы можем определить и слагающие тока во внешней цепи, для которой мы вывели уравнение

$$e = E + ir + x_a \frac{di}{du}, \quad (28)$$

где x_a в зависимости от схемы определяется формулами (2), (9) и (18).



Фиг. 8. Эффективные значения высших гармоник U_k в процентах в зависимости от степени регулирования $100 = \frac{U_k}{U_{cp}}$.

Среднее значение выпрямленного тока будет равно

$$I_{cp} = \frac{U_{cp} - E}{r}, \quad (29)$$

где U_{cp} определяется по формулам (5), (12), (21).

Эффективные значения гармоник тока могут быть вычислены как отношение соответствующих гармоник напряжений, которые равны [формула (24)]

$$U_6 = Q_6 U_{cp}; U_{12} = Q_{12} U_{cp}; U_{18} = Q_{18} U_{cp}; \dots$$

к своим импедансам.

Так как x_a представляет собой реактивные сопротивления при частоте сети ($f=50$ Hz), то для высших гармоник реактансы будут в $k=6, 12, 18, \dots$ раз больше.

Поэтому эффективные значения высших гармоник тока будут равны

$$I_6 = \frac{U_6}{\sqrt{r^2 + 36x_a^2}}; I_{12} = \frac{U_{12}}{\sqrt{r^2 + 144x_a^2}}; \dots \quad (30)$$

В большинстве случаев для гармоник, уже начиная с 12-й, реактивное сопротивление kx_a по величине будет отличаться от полного сопротивления на ничтожную величину, а поэтому для следующих гармоник тока мы будем иметь

$$I_{18} = \frac{U_{18}}{18x_a}; I_{24} = \frac{U_{24}}{24x_a}; \dots \quad (31)$$

Среди гармоник наибольшую роль играет первая гармоника с шестикратной частотой. Так при регулировании $U_{cp} = 0,8 U_{cp0}$ высшие гармоники составляют $U_6 = 0,185 U_{cp}$, $U_{12} = 0,09 U_{cp}$ и при $x_a = 0,3r$ высшие гармоники тока, выраженные через среднее значение тока, будут равны:

$$I_6 = 0,09 I_{cp}, I_{12} = 0,023 I_{cp}.$$

Зная слагающие токи, мы можем определить эффективное значение тока во внешней цепи:

$$I = \sqrt{I_{cp}^2 + I_6^2 + I_{12}^2 + I_{18}^2 + \dots}, \quad (32)$$

а также и эффективное значение напряжения, например, у клемм электролитической ванны, если она составляет нагрузку выпрямительной установки,

$$U = \sqrt{U_{cp}^2 + r^2 (I_6^2 + I_{12}^2 + I_{18}^2 + \dots)}. \quad (33)$$

Вообще говоря, эффективные значения будут мало отличаться от средних (в пределах до 1—2%). Однако значение высших гармоник важно в том отношении, что они определяют пределы возможных отклонений тока от его среднего значения. Высшие гармоники токов будут иметь разные сдвиги, и амплитудные их значения не будут совпадать по времени. Но для установления возможных пределов отклонения мы можем принять, что амплитудные значения совпадают по времени.

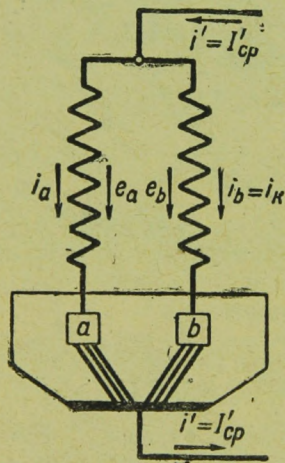
Отклонения мгновенных значений тока от его среднего значения будут не больше, чем

$$\pm \sqrt{2} (I_6 + I_{12} + I_{18} + \dots). \quad (34)$$

II. НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКИ ВО ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ С УЧЕТОМ ПЕРЕКРЫТИЯ

6. ПЕРЕХОД ДУГИ С ОДНОГО АНОДА НА ДРУГОЙ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ

Переход дуги с одного анода на другой происходит не мгновенно, как это мы предполагали выше, а происходит в течение определенного промежутка времени, который зависит от величины нагрузочного тока, от реактанса трансформатора и от угла регулирования.



Фиг. 9. Перекрывание двух анодов.

Во время перехода дуги с одного анода на другой, например, с анода a на анод b , соединенные с этими анодами фазовые обмотки трансформатора замыкаются накоротко через вольтовую дугу ртутного выпрямителя (фиг. 9), и образующиеся в этой короткозамкнутой цепи под действием разности э. д. с. $e_b - e_a$ ток i_k накладывается на ток в предыдущей фазе a , уменьшая его

$$i_a = i' - i_k,$$

где i' — суммарный ток, проходящий через обе фазы, a и b . В последующей же фазе b мы будем иметь

$$i_b = i_k,$$

так как

$$i_a + i_b = i'.$$

Когда ток i_k достигнет величины тока в неразветвленной части цепи, т. е.

$$i_b = i_k = i',$$

ток в фазе a спадает до нуля, $i_a = 0$, и переход дуги с фазы a на фазу b окончится.

Величина выпрямленного тока, приходящегося на рассматриваемые аноды или фазы (a и b), вообще говоря, будет величиной переменной. Она будет состоять из некоторого среднего значения I_{cp} и ряда гармоник, которые будут тем значительнее по своей относительной величине, чем меньше нагрузка.

С другой стороны, как мы увидим ниже, так называемый угол перекрытия, определяющий время перехода дуги с одного анода на другой, будет уменьшаться по мере увеличения угла регулирования и уменьшения нагрузки.

Поэтому, учитывая сравнительно небольшие относительные значения гармоник, мы без большой погрешности можем принять, что в начале и в конце перекрытия ток в неразветвленной части цепи имеет одно и то же значение и равняется среднему значению выпрямленного тока, приходящегося на долю рассматриваемых анодов, т. е.

$$i' = I'_{cp} = \frac{I_{cp}}{m},$$

где $m = 1$ для схемы без отсасывающей катушки, $m = 2$ для схемы с двухфазной катушкой и $m = 3$ — с трехфазной катушкой.

Распространяя способ определения угла перекрытия, предложенный Делленбахом, на случай с управляемыми сетками, мы можем написать следующую зависимость тока i_k от времени:

$$e_b - e_a = i_k \cdot 2r_2 + 2x_2 \frac{di_2}{du},$$

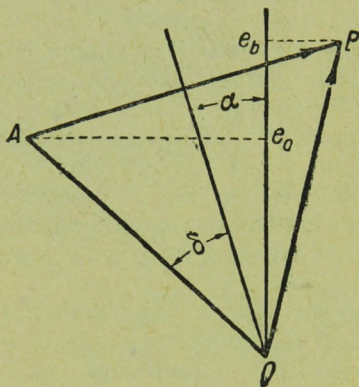
где r_2 и x_2 — сопротивление и реактанс одной фазы трансформатора. Влиянием падения напряжения в дуге мы пренебрегаем.

При регулировании на угол α ток начнет переходить с одного анода на другой не в момент равенства э. д. с. e_a и e_b ,

т. е. не в момент, когда соответствующие векторы этих э. д. с. (фиг. 10)

$$OA = OB = U_2 \sqrt{2}$$

дают одинаковые проекции на вертикальную ось, а позднее на угол α в момент сообщения сетке второго анода положительного потенциала.



Разность э. д. с. может быть представлена вектором

$$\overline{AB} = \overline{OB} - \overline{OA};$$

$$AB = 2U_2 \sqrt{2} \sin \delta,$$

где δ — половина разности фаз э. д. с. в обмотках a и b . Будем вести отчет времени t с момента начала перехода дуги с одного анода на другой. Тогда разность $e_b - e_a$ может быть выражена через

Фиг. 10. Векторная диаграмма двух сменяющих друг друга фаз.

$$e_b - e_a = 2U_2 \sqrt{2} \sin \delta \sin (\omega t + \alpha).$$

Стационарный ток, который протекал бы через рассматриваемые две фазы, при их коротком замыкании изменялся бы по закону

$$i_{k \text{ стаз}} = \frac{2U_2 \sqrt{2} \sin \delta \sin (\omega t + \alpha - \varphi)}{\sqrt{(2r_2)^2 + (2x_2)^2}}.$$

Кроме стационарного тока при коротком замыкании возникают так называемые свободные или экстра-токи, которые в данном случае будут состоять, по крайней мере, из двух слагающих, так как мы имеем магнитную связь вторичных обмоток трансформатора с первичными. Поэтому мы можем написать

$$i_k = \frac{2U_2 \sqrt{2} \sin \delta \sin (\omega t + \alpha - \varphi)}{\sqrt{(2r_2)^2 + (2x_2)^2}} + \sum \text{const } \varepsilon^{pt},$$

где p — отрицательная величина, зависящая от соотношения сопротивлений и индуктивностей. Ввиду весьма небольшой относительной длительности перекрытия (обыкновенно не более $\frac{1}{12}$ основного периода) и относительно малого значения сопротивления r_2 по отношению к реактанцу x_2 мы можем r_2 и pt приравнять нулю, а угол φ приравнять 90° . Тогда уравнение для i_k принимает вид

$$i_k = -\frac{\sqrt{2}U_2 \sin \delta}{x_2} \cos(\omega t + \alpha) + \text{const.} \quad (35)$$

В начальный момент весь ток $I' = \frac{I_{cp}}{m}$ проходит через фазу a , и ток в фазе b будет равен

$$i_{b_0} = i_{k_0} = -\frac{\sqrt{2}U_2 \sin \delta}{x_2} \cos \alpha + \text{const} = 0,$$

откуда

$$\text{const} = \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \delta}{x_2} \cos \alpha$$

и

$$i_b = i_k = \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \delta}{x_2} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)]. \quad (36)$$

Переход дуги с одного анода на другой закончится в момент t' или $\omega t' = \gamma$ (угол γ называется углом перекрытия), когда

$$i_a = 0 \quad \text{и} \quad i_b = i_k = \frac{I_{cp}}{m},$$

поэтому

$$\frac{I_{cp}}{m} = \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \delta}{x_2} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)],$$

или

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_{cp} x_2}{m \cdot \sqrt{2}U_2 \sin \delta} = 2K, \quad (37)$$

где K , как мы увидим дальше (см. § 9), представляет собой относительное падение напряжения при данной нагрузке вследствие перекрытия.

На основании уравнения (37) мы можем преобразовать уравнение (36):

$$i_b = i_k = \frac{I_{cp}}{m} \cdot \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)}. \quad (38)$$

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Из вывода, приведенного выше, мы видим, что угол перекрытия зависит от нагрузки I_{cp} , от реактанта трансформатора x_2 и от угла регулирования α .

Остановимся на более подробном определении значений K [в последнем уравнении (37)] для рассмотренных нами трех схем и приведем его в более удобный для вычисления вид.

Реактанцы трансформаторов даются обыкновенно в процентах от номинального первичного напряжения, когда через первичную обмотку протекает номинальный ток и вторичные обмотки коротко замкнуты.

Хотя вторичная сторона трансформатора и имеет двойное число фаз, но так как во вторичных обмотках ток поочередно течет лишь в течение одной половины периода, а в течение следующей половины периода он равен нулю, то в отношении первичной обмотки шестифазный работающий на ртутник трансформатор равноценен трансформатору с трехфазной вторичной обмоткой, в которой ток проходит как в том, так и в другом направлении.

Во избежание несимметрии потоков рассеяния и для уменьшения механических сил воздействия при коротких замыканиях вторичные обмотки противоположных фаз, сидящие на одном стержне в трансформаторе, распределяются симметрично и по возможности равномерно по всей длине стержня (фиг. 11).

Удвоение числа вторичных фаз, поскольку ток в каждой из противоположных фаз течет лишь в одном направлении, не влияет на значение реактанта со стороны первичной обмотки при коротком замыкании вторичной обмотки. Если при опыте короткого замыкания на вторичной стороне на каждом стержне

коротко замкнуть одну или две противоположных обмотки, то мы на первичной стороне при номинальном токе получим одно и то же напряжение, если пренебречь омическим сопротивлением обмотки и если считать, что витки обеих половин охватываются общим потоком рассеяния.

Поэтому при одинаковом числе витков в каждой фазе первичной и вторичной обмоток ($U_1 = U_2$) мы можем принять, что

$$x_{k2} + x_{k1} = x_k.$$

В случае двойной шестифазной звезды без отсасывающей катушки ($m=1$) угол между векторами э. д. с. двух сменяющих друг друга фаз равен 60° , и поэтому $\delta=30^\circ$ и $\sin \delta=0,5$.

В рассматриваемой схеме ток во вторичной обмотке трансформатора протекает в каждой фазе лишь в течение одной шестой периода $\left(\frac{1}{6} T\right)$ и равен за это время $I'_{cp} = I_{cp}$.

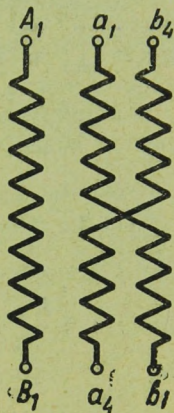
В каждой фазе первичной обмотки, если она соединена треугольником, ток будет протекать за время одной половины периода в течение $\frac{1}{6} T$ и за вторую половину периода

такое же время, т. е. ток в каждой фазе первичной обмотки будет протекать в течение лишь одной трети периода.

И хотя ток за это время будет иметь отклонение от своего среднего значения и благодаря наличию гармоник и благодаря перекрытию анодов и длительность прохождения токов немного увеличится, однако мы не сделаем большой ошибки, если с этими отступлениями не будем считаться.

Поэтому мы эффективное значение первичного тока для схемы без отсасывающей катушки можем выразить следующим образом через среднее значение выпрямленного тока:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{3} I_{cp}^2} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{3}}.$$



Фиг. 11. Схема обмотки трансформатора.

или

$$I_{cp} = \sqrt{3} I_1. \quad (38')$$

Подставляя вместо I_{cp} его выражение через первичный ток и полагая, что и первичный ток изменяется пропорционально нагрузке:

$$I_{cp} : I_{cp \max} = I_1 : I_{1 \max} \quad (39)$$

(где $I_{cp \max}$ и $I_{1 \max}$ — среднее значение выпрямленного тока и эффективное значение первичного тока при номинальной полной нагрузке), мы можем уравнение (37) написать в следующем виде ($m = 1$; $x_2 = x_k$ и $\sin \delta = 0,5$):

$$\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2} \cdot 0,5} \cdot \frac{I_{1 \max} x_k}{U_2} \cdot \frac{I_1}{I_{1 \max}} = 2K;$$

отношение $\frac{I_{1 \max} x_k}{U_2}$ представляет собой реактанс короткого замыкания, выраженный в долях номинального напряжения; мы его можем выразить через $\frac{x_k^0}{100}$. Заменяя, кроме того, отношение первичных токов отношением соответствующих средних значений выпрямленного тока, мы приводим уравнение для определения угла перекрытия к следующему виду:

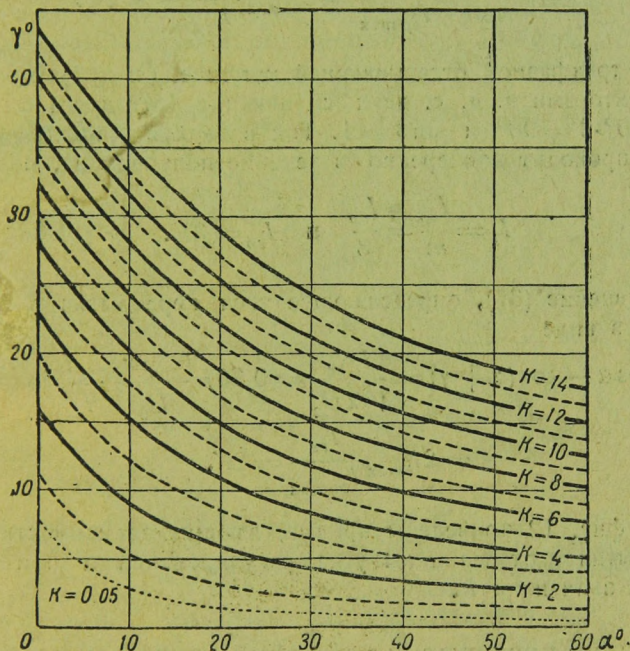
$$\begin{aligned} \cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma) &= 2,45 \frac{x_k^0}{100} \cdot \frac{I_{cp}}{I_{cp \max}} = \\ &= 2K_{\max} \frac{I_{cp}}{I_{cp \max}} = 2K. \end{aligned} \quad (40)$$

В схеме с двухфазной отсасывающей катушкой ($m = 2$) угол между векторами э. д. с. двух сменяющих друг друга фаз равен 120° , $\delta = 60^\circ$, $\sin \delta = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Ток через каждую фазу вторичной обмотки проходит в течение двух третей полупериода

или одной трети целого периода и равен за это время с учетом выше сделанных оговорок

$$I'_{cp} = \frac{I_{cp}}{2}.$$

В каждой фазе первичной обмотки такой же ток будет про-



Фиг. 12. Зависимость угла перекрытия γ от угла регулирования α и различных относительных падений напряжения K .

текать в течение двух третей полного периода, поэтому эффективное значение первичного тока будет равно

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_{cp}}{2} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{6}}, \text{ или } I_{cp} = \sqrt{6} I_1. \quad (41)$$

Уравнение (37), определяющее значение угла перекрытия, получается в следующем виде:

$$\begin{aligned}\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma) &= \frac{\sqrt{6}}{2 \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} \cdot \frac{I_1 x_2}{U_2} = \\ &= \frac{I_{1 \max} x_k}{U_2} \cdot \frac{I_{cp}}{I_{cp \max}} = 2K_{\max} \cdot \frac{I_{cp}}{I_{cp \max}} = 2K.\end{aligned}\quad (42)$$

При трехфазной отсасывающей катушке ($m=3$) угол между векторами э. д. с. двух сменяющих друг друга фаз равен $180^\circ \cdot \delta = 90^\circ$ и $\sin \delta = 1$. Ток в двух противоположных фазах проходит поочередно в течение полупериода, поэтому

$$I_1 = \frac{I_{cp}}{m} = \frac{I_{cp}}{3} \quad \text{и} \quad I_{cp} = 3I_1. \quad (43)$$

Уравнение (37), определяющее угол перекрытия γ , получается в виде

$$\begin{aligned}\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma) &= \frac{I_1 x_2}{\sqrt{2} U_2} = 0,707 \frac{I_{1 \max} x_k}{U_2} \cdot \frac{I_{cp}}{I_{cp \max}} = \\ &= 2K_{\max} \frac{I_{cp}}{I_{cp \max}} = 2K.\end{aligned}\quad (44)$$

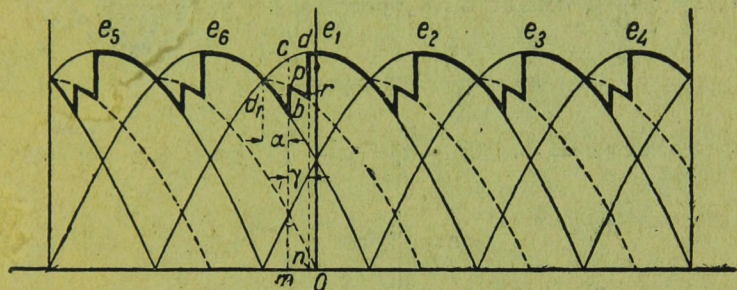
На фиг. 12 приведены кривые, дающие зависимость угла перекрытия γ от величины угла регулирования α при различных значениях K .

8. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКРЫТИЯ НА ФОРМУ КРИВОЙ И НА СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ

Когда два анода перекрываются вольтовой дугой в ртутнике, то связанные с этими анодами фазы трансформатора (например, a и b фиг. 9), замкнутые между собой накоротко, по отношению к внешней цепи действуют, как два параллельно соединенных источника тока. Эти две параллельные фазы по отношению к внешней цепи могут быть заменены

одной ветвью с половинным сопротивлением и реактансом и с э. д. с., которая в каждый момент будет равна полусумме э. д. с. этих двух фаз. На векторной диаграмме эта эквивалентная э. д. с. может быть представлена полусуммой векторов соответствующих фазовых э. д. с.

Поэтому в схеме двойной звезды без отсасывающей катушки (фиг. 1) в определяемый углом регулирования момент начала перевода дуги, положим, с шестого анода на первый, действующая по отношению к внешней цепи э. д. с.



Фиг. 13 Кривая выпрямленного напряжения в схеме без отсасывающей катушки при перекрытии анодов.

(фиг. 13) не увеличится сразу до величины mc , что имело бы место при скачкообразном переходе тока с одного анода на другой, но до величины $mp = \frac{mb + mc}{2}$. В дальнейшем эта э. д. с. будет изменяться по кривой pr , ординаты которой равны полусумме ординат синусоид e_1 и e_6 , пока не окончится перекрытие. В момент окончания перекрытия (по прохождении угла γ) э. д. с., действующая по отношению к внешней цепи, сделает опять скачок с величины nr до величины nd .

Кривая pr является отрезком синусоиды $a_1 pr$, и если уравнение синусоиды e_1 может быть представлено относительно начала координат O в виде

$$e = E_m \cos u = U_2 \sqrt{2} \cos u,$$

то уравнение синусоиды $a_1 pr$ будет

$$e = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \cos(u + 30^\circ).$$

Синусоида $a_1 pr$ опережает синусоиду e_1 на угол 30° .

Таким образом кривая выпрямленного напряжения, имеющая шестикратную периодичность (период этой кривой соответствует $\frac{\pi}{3}$), может быть представлена уравнением

$$e = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \cos(u + 30^\circ)$$

в пределах от $u = -(30^\circ - \alpha) = \alpha - 30^\circ$ до $u = \alpha + \gamma - 30^\circ$

и

$$e = E_m \cos u$$

в пределах от $u = \alpha + \gamma - 30^\circ$ до $u = \alpha + 30^\circ$. (45)

Зная кривую выпрямленного напряжения, можем определить и его среднее значение

$$\begin{aligned} U_{cp} &= \frac{3}{\pi} \left[\int_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \cos(u + 30^\circ) du + \int_{\alpha+\gamma-30^\circ}^{\alpha+30^\circ} E_m \cos u du \right] = \\ &= \frac{3}{\pi} E_m \left[\left| \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(u + 30^\circ) \right|_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} + \left| \sin u \right|_{\alpha+\gamma-30^\circ}^{\alpha+30^\circ} \right] = \\ &= U_{cp0} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha + \gamma) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha + \sin(\alpha + 30^\circ) - \right. \\ &\quad \left. - \sin(\alpha + \gamma - 30^\circ) \right] = U_{cp0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}. \quad (46) \end{aligned}$$

Но на основании уравнения (40)

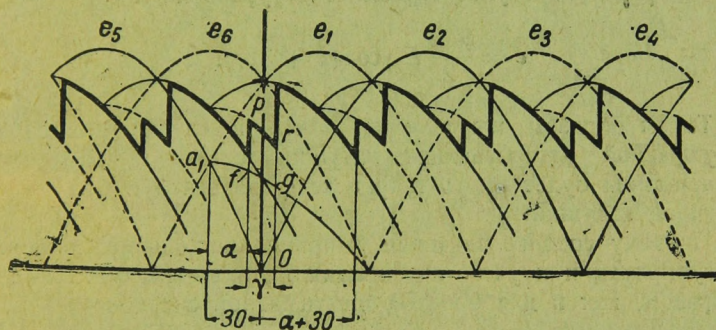
$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = 2K,$$

поэтому среднее значение выпрямленного напряжения при регулировании с учетом перекрытия будет равно

$$U_{cp} = U_{cp0} (\cos \alpha - K). \quad (47)$$

В схеме с двухфазной катушкой мы будем иметь ту же картину в отношении двух перекрывающихся анодов, принадлежащих к одной звезде (например, к звезде 1, 3, 5, фиг. 3).

При регулировании на угол α дуга с пятого анода на первый начнет переходить не в точке a_1 (фиг. 14), а с опозданием на угол α , в точке f , и в течение перекрытия напряжение, даваемое пятой и первой фазами (равное полусумме ординат синусоид e_5 и e_1), будет изменяться по кривой fg ,



Фиг. 14. Кривая выпрямленного напряжения в схеме с двухфазной катушкой при перекрытии анодов.

которая представляет собой отрезок синусоиды $a_1 fg$, совпадающей по фазе с синусоидой e_6 и имеющей половинную амплитуду $\frac{U_2 \sqrt{2}}{2}$.

Так как отсасывающая катушка выравнивает напряжения с одной стороны фазы пятой e_6 и с другой стороны параллельно соединенных фаз пятой и первой, перекрытых дугой, то эквивалентное напряжение будет равно полусумме ординат синусоиды e_6 и синусоиды $a_1 fg$.

В результате мы получаем отрезок синусоиды pr , которая совпадает по фазе с синусоидой e_6 и имеет амплитуду

$$\frac{3}{4} U_2 \sqrt{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} U_2 \sqrt{2}.$$

Поэтому, если уравнение кривой выпрямленного напряжения относительно оси ординат, проходящей через точку O , будет в пределах от $u = -[30^\circ - (\alpha + \gamma)] = \alpha + \gamma - 30^\circ$ до $u = \alpha + 30^\circ$

$$e = E_m \cos u = \frac{\sqrt{3}}{2} U_2 \sqrt{2} \cos u, \quad (48)$$

то кривая pr в пределах от $u = -(30 - \alpha) = \alpha - 30^\circ$ до $u = \alpha + \gamma - 30^\circ$ будет определяться уравнением

$$e = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \cos (u + 30^\circ). \quad (49)$$

Таким образом мы получили, что в случае применения двухфазной отсасывающей катушки кривая выпрямленного напряжения будет иметь такую же форму, что и без отсасывающей катушки.

Поэтому среднее значение выпрямленного напряжения при регулировании и учете перекрытия будет выражаться таким же образом, как и для простой шестифазной звезды:

$$U_{cp} = U_{cp0} \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)}{2} = U_{cp0} (\cos \alpha - K), \quad (50)$$

где K определяется уравнением (42).

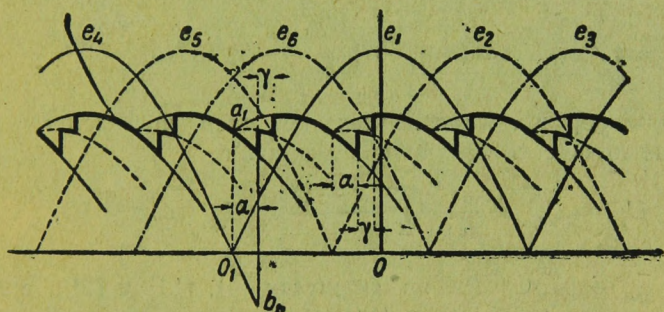
Аналогичное соотношение получается и в случае трехфазной катушки. При регулировании переход дуги с четвертого на первый анод будет происходить с опозданием на соответствующий угол α (фиг. 15); э. д. с. в четвертой фазе будет иметь при этом отрицательное значение. Если тем не менее ток будет проходить через четвертый анод, то получаться это будет за счет того, что в фазе Oa (фиг. 5) трехфазной отсасывающей катушки под действием токов в двух других фазах Ob и Oc будет наводиться такая положитель-

ная э. д. с., которая, складываясь с э. д. с. четвертой фазы трансформатора, даст положительное напряжение.

При сообщении сетке положительного потенциала дуга начнет переходить с четвертого на первый анод, причем во время этого перехода напряжение, даваемое параллельно соединенными четвертой и первой фазами, будет равно нулю:

$$\frac{e_4 + e_1}{2} = 0.$$

Так как выпрямленное напряжение равно среднему арифметическому э. д. с., даваемых тремя как бы самостоятельными



Фиг. 15. Кривая выпрямленного напряжения в схеме с трехфазной катушкой при перекрытии анодов.

системами 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6, то во время перекрытия четвертого и первого анодов выпрямленное напряжение будет равно

$$e = \frac{1}{3} \left[\frac{e_4 + e_1}{2} + e_5 + e_6 \right] = \frac{e_5 + e_6}{3},$$

т. е. будет равно одной трети суммы ординат синусоид e_5 и e_6 . Соответствующий отрезок кривой, представляющий собой э. д. с. во время перекрытия, является частью синусоиды с амплитудой

$$\frac{2}{3} \frac{\sqrt{2}}{2} U_2 \sqrt{2} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_2 \quad (51)$$

и с вершиной, имеющей своей абсциссой точку a_1 .

Кривая выпрямленного напряжения, когда фаза первая полностью сменит фазу четвертую, в пределах от $u = - [30^\circ - (\alpha + \gamma)] = \alpha + \gamma - 30^\circ$ до $u = \alpha + 30^\circ$ выразится уравнением

$$e = \frac{2}{3} U_2 \sqrt{2} \cos u = E_m \cos u, \quad (52)$$

а во время перекрытия в пределах от $u = \alpha - 30^\circ$ до $u = \alpha + \gamma - 30^\circ$ — уравнением

$$e = \sqrt{\frac{2}{3}} U_2 \cos(u + 30^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \cos(u + 30^\circ). \quad (53)$$

Таким образом мы для всех трех схем получаем тождественные кривые со средними значениями

$$U_{cp} = U_{cp0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} = U_{cp0} (\cos \alpha - K), \quad (54)$$

где U_{cp0} определяется по формулам (4), (11) и (20), а K — по формулам (40), (42) и (44) в зависимости от схемы.

На фиг. 16 представлена в виде кривых зависимость среднего значения выпрямленного напряжения U_{cp} (без учета потери напряжения в дуге и омических потерь в трансформаторе) от угла регулирования α при разных значениях угла перекрытия γ . Средние значения U_{cp} отложены по оси ординат в процентах от U_{cp0} .

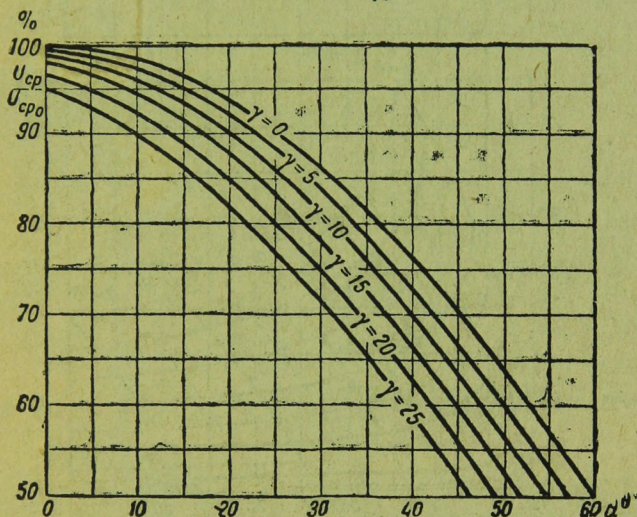
Так как на основании уравнений (40), (42) и (44)

$$\frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)}{2} = \frac{K_{\max}}{I_{cp \max}} I_{cp} = K,$$

при неизменном значении выпрямленного тока разность $\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)$ сохраняет при всех углах регулирования α свое значение, то мы на основании этого уравнения можем опре-

делить, как изменяется угол перекрытия и при изменении угла регулирования. Пусть при заданном значении выпрямленного тока и при отсутствии регулирования ($\alpha = 0$) угол перекрытия (который мы можем для заданного значения K определить по ординате для $\alpha = 0$ на фиг. 12) будет γ_0 . Тогда

$$\begin{aligned}\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma) &= \cos 0^\circ - \cos (0^\circ + \gamma_0) = \\ &= 1 - \cos \gamma_0.\end{aligned}\quad (55)$$



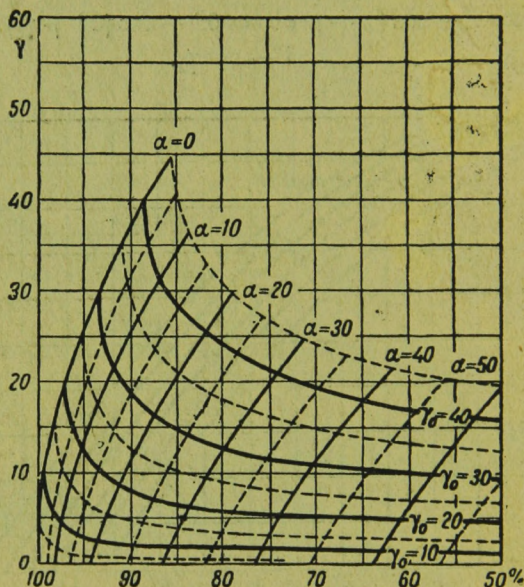
Фиг. 16. Средние значения U_{cr} в процентах от U_{cr0} в зависимости от α и γ

С другой стороны,

$$\frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)}{2} = \frac{U_{cr}}{U_{cr0}}. \quad (56)$$

На основании этих двух последних уравнений мы можем для данной степени регулирования ($U_{cr}:U_{cr0}$) и для заданного значения выпрямленного тока I_{cr} (определяющего значение K , а следовательно, и γ_0 при $\alpha = 0$) вычислить значения угла перекрытия и при разных значениях α .

Эти вычисленные значения нанесены в виде кривых на фиг. 17 как функция $\frac{U_{cp}}{U_{cp0}} \cdot 100\%$ при разных значениях γ_0 и α . Как видно из этих кривых, угол перекрытия по мере



Фиг. 17. Зависимость угла перекрытия γ от степени регулирования $\frac{U_{cp}}{U_{cp0}}$ при разных углах регулирования и при разных углах первоначального перекрытия γ_0 , но при одном и том же значении выпрямленного тока I_{cp} .

увеличения угла регулирования уменьшается. С другой стороны, из этих кривых мы видим, какое влияние оказывает перекрытие на среднее значение выпрямленного напряжения при разных углах регулирования α и, в частности, насколько перекрытие снижает выпрямленное напряжение при отсутствии регулирования, $\alpha = 0$.

9. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ С УЧЕТОМ ПЕРЕКРЫТИЯ

Для того чтобы получить действительное среднее значение выпрямленного напряжения, действующего во внешней цепи, необходимо из $U_{cp0} \cos \alpha$ вычесть:

1. Падение напряжения, обусловленное перекрытием анодов K .

2. Потерю напряжения в вольтовой дуге ΔU (которая равна 20—25 В и почти не зависит от нагрузки).

3. Омическое падение напряжения в трансформаторе.

Падение напряжения от перекрытия пропорционально среднему значению выпрямленного тока

$$U_{cp0} K = U_{cp0} K_{\max} \frac{I_{cp}}{I_{cp \max}} = B I_{cp}, \quad (57)$$

где

$$B = \frac{U_{cp0} K_{\max}}{I_{cp \max}}. \quad (58)$$

Таблица ($U_2 = U_1$)

Схема	Двойная звезда	Двухфазная катушка	Трехфазная катушка	Формулы
U_{cp0}	1,35 U_2	1,17 U_2	0,9 U_2	(4), (11), (20)
$I_1 = a I_{cp}$	0,578 I_{cp}	0,409 I_{cp}	0,333 I_{cp}	(38), (41), (43)
K	$\frac{1,23 x_k^0}{100 I_{cp \max}} I_{cp}$	$\frac{0,5 x_k^0}{100 I_{cp \max}} I_{cp}$	$\frac{0,353 x_k^0}{100 I_{cp \max}} I_{cp}$	(40), (42), (44)

Омические потери в трансформаторе могут быть выражены через $I_1 r_k$, где r_k — активное сопротивление, определяемое из опыта короткого замыкания, а I_1 — первичный ток, который, если не считать намагничивающей слагающей тока, находится в прямой пропорциональной зависимости от среднего значения выпрямленного тока:

$$I_1 r_k = a r_k I_{cp}. \quad (59)$$

Поэтому для получения действительного среднего напряжения, располагаемого во внешней цепи $U_{вн}$, мы должны из $U_{ср} \cos \alpha$ вычесть указанные падения напряжения:

$$U_{вн} = U_{ср0} \cos \alpha - \Delta U - (ar_k + B) I_{ср}. \quad (60)$$

ΔU и $ar_k I_{ср}$ являются действительно потерями напряжения, связанными с непроизводительной затратой энергии, снижающими к. п. д. установки. $B I_{ср}$ не связано с затратой энергии. Это падение напряжения обусловлено перекрытием, и оно снижает лишь коэффициент мощности, как мы увидим дальше.

Из последнего уравнения видно, что при постоянном угле регулирования ($\alpha = \text{const}$) внешняя характеристика будет представляться в виде наклонной прямой, а для разных, но постоянных значений угла α мы получаем ряд параллельных линий.

При двойной трехфазной звезде без отсасывающей катушки эти прямые параллельные линии будут начинаться от самых малых токов. На фиг. 18 вычерчен ряд таких кривых, когда

$$\begin{aligned} \frac{3}{\pi} U_2 \sqrt{2} &= U_{ср0} = 1\,000 \text{ В}, \\ \Delta U &= 30 \text{ В}, \quad x_k \% = 10 \% \end{aligned}$$

и

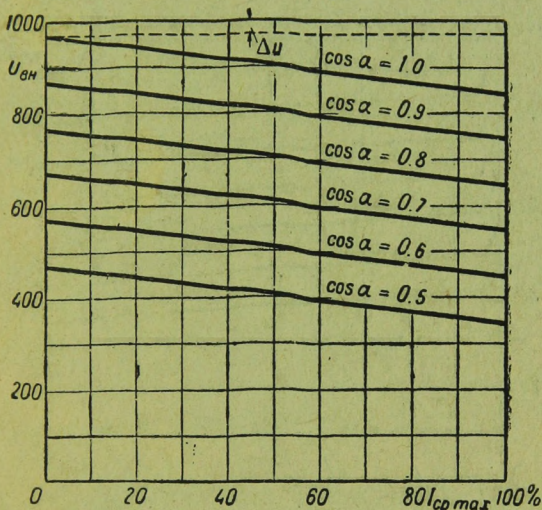
$$\cos \alpha = 1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6 \text{ и } 0,5.$$

При отсасывающих катушках, как известно, характеристика состоит из двух прямолинейных ветвей, имеющих резкий перелом. Обусловлено это тем, что при очень малых токах, меньших, чем так называемые намагничивающие токи в отсасывающей катушке, ртутник, несмотря на наличие отсасывающей катушки, работает как обыкновенный шестианодный выпрямитель с двойной звездой, каждый анод горит не одну треть или половину периода, а лишь одну шестую часть периода. Включенные катушки будут создавать очень большие индуктивные падения напряжения, и благодаря этому получается очень крутой спад выпрямленного напряжения.

Определенное нами выше значение выпрямленного напряжения $U_{ср0}$ будет, если не считать потери напряжения в дуге

и т. д., равно значению ординаты кривой напряжения в точке перегиба.

Положение точки перегиба зависит от величины реактанса отсасывающей катушки. В установках, работающих с переменной и при том иногда весьма малой нагрузкой тока, точка перегиба устанавливается при токах, составляющих примерно 1% от максимального (номинального) тока. В установках, работающих с постоянной нагрузкой, реактансы отсасы-



Фиг. 18. Внешняя характеристика ргнутых выпрямителей без отсасывающей катушки, $U_{ср} = \frac{3}{\pi} U_2 \sqrt{2} = 1000 \text{ V}$, $x_k = 10\%$.

вающих катушек могут быть взяты меньшими, и точки перегиба могут быть допущены и не при таких малых токах.

На фиг. 19 и 20 показаны характеристики для схем с двухфазной и трехфазной катушками:

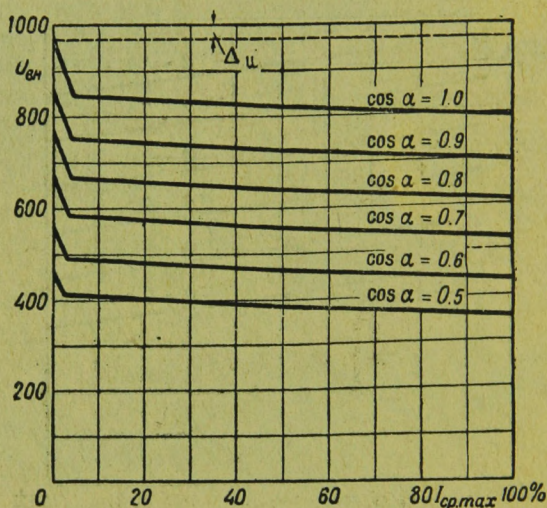
$$\frac{3}{\pi} U_2 \sqrt{2} = 1000 \text{ V}; \Delta U = 30 \text{ V}; x_k \% = 10\%$$

и

$$\cos \alpha = 1; 0,9; \dots; 0,5.$$

Точка перегиба соответствует току в 50% от номинального тока, когда $\alpha = 0$.

Наклон характеристик в длинной своей части зависит от реактанта трансформатора x_k 0/0. При прочих равных условиях падение напряжения в случае двойной звезды без отсасывающей катушки будет больше, чем при двухфазной отсасывающей катушке, а при двухфазной отсасывающей катушке — больше, чем при трехфазной.



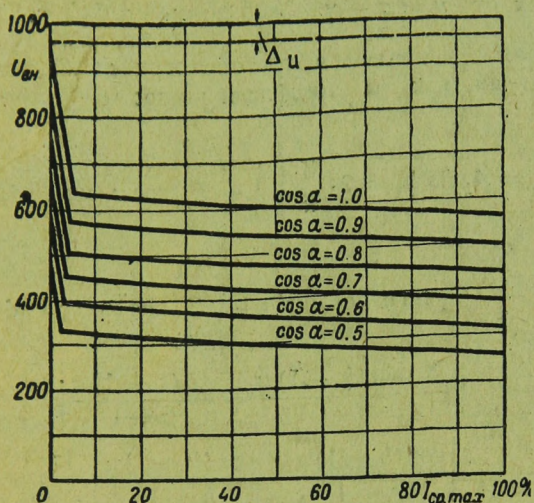
Фиг. 19. Внешняя характеристика ртутных выпрямителей с двухфазной катушкой, $\frac{3}{\pi} U_2 \sqrt{2} = 1000$ В, $x_k = 10$ 0/0.

Если напряжение в точке перегиба для двух последних случаев рассматривать за начальное, то падения напряжения между этим начальным напряжением и напряжением при полной нагрузке будут относиться как

$$1,23:0,5:0,354 = 3,5:1,41:1.$$

При разных углах регулирования падения напряжения между начальным его значением и значением при полной нагрузке сохраняют свои абсолютные значения. Поэтому, чем

больше мы будем снижать напряжение при регулировании, тем больше будут в процентном отношении падения напряжения.



Фиг. 20. Внешняя характеристика ртутных выпрямителей с трехфазной катушкой, $\frac{3}{\pi} U_2 \sqrt{2} = 1000 \text{ V}$, $x_k = 10\%$.

10. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКРЫТИЯ НА ГАРМОНИКИ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Перекрытие анодов помимо снижения выпрямленного напряжения вносит также изменения в значения гармоник выпрямленного напряжения.

Кривая выпрямленного напряжения с учетом перекрытия, как выведено было выше, имеет шестикратную периодичность и определяется для всех трех схем следующими уравнениями:

$$e = E_m \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(u + 30^\circ) = \frac{3}{4} E_m \cos u - \frac{\sqrt{3}}{4} E_m \sin u$$

в пределах от $u = \alpha - 30^\circ$ до $u = \alpha + \gamma - 30^\circ$

$$e = E_m \cos u$$

в пределах от $u = \alpha + \gamma - 30^\circ$ до $u = \alpha + 30^\circ$.

Разлагаем эту кривую в тригонометрический ряд по общим правилам, как мы это делали выше:

$$\begin{aligned} A'_k &= A_k \sin \phi_k = 2 \cdot \frac{3}{\pi} \left[\int_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} \frac{3}{4} E_m \cos u \cdot \cos ku \, du - \right. \\ &\quad \left. - \int_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} \frac{\sqrt{3}}{4} E_m \sin u \cdot \cos ku \, du + \int_{\alpha+\gamma-30^\circ}^{\alpha+30^\circ} E_m \cos u \cdot \cos ku \, du \right] = \\ &= \frac{3}{\pi} E_m \left[\frac{3}{4} \left| \frac{\sin(k-1)u}{k-1} + \frac{\sin(k+1)u}{k+1} \right|_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sqrt{3}}{4} \left| \frac{\cos(k-1)u}{k-1} - \frac{\cos(k+1)u}{k+1} \right|_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} + \right. \\ &\quad \left. + \left| \frac{\sin(k-1)u}{k-1} + \frac{\sin(k+1)u}{k+1} \right|_{\alpha+\gamma-30^\circ}^{\alpha+30^\circ} \right] = \\ &= (-1)^{\frac{k}{6}} U_{c_{r_0}} \frac{1}{2} \left[\frac{\cos(k-1)\alpha}{k-1} - \frac{\cos(k+1)\alpha}{k+1} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cos(k-1)(\alpha+\gamma)}{k-1} - \frac{\cos(k+1)(\alpha+\gamma)}{k+1} \right] = M'_k U_{c_{p_0}}. \quad (61) \end{aligned}$$

Таким же путем определяется и другая составляющая:

$$\begin{aligned} A''_k &= A_k \cos \phi_k = 2 \cdot \frac{3}{\pi} \left[\int_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} \frac{3}{4} E_m \cos u \cdot \sin ku \, du - \right. \\ &\quad \left. - \int_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} \frac{\sqrt{3}}{4} E_m \sin u \cdot \sin ku \, du + \int_{\alpha+\gamma-30^\circ}^{\alpha+30^\circ} E_m \cos u \cdot \sin ku \, du \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{3}{\pi} E_m \left[\frac{3}{4} \left| \frac{\cos(k-1)u}{k-1} + \frac{\cos(k+1)u}{k+1} \right|_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} - \right. \\
&\quad \left. - \frac{\sqrt{3}}{4} \left| \frac{\sin(k-1)u}{k-1} - \frac{\sin(k+1)u}{k+1} \right|_{\alpha-30^\circ}^{\alpha+\gamma-30^\circ} + \right. \\
&\quad \left. + \left| \frac{\cos(k-1)u}{k-1} + \frac{\cos(k+1)u}{k+1} \right|_{\alpha+\gamma-30^\circ}^{\alpha+30^\circ} \right] = \\
&= (-1)^{\frac{k}{2}} U_{cp0} \frac{1}{2} \left[\frac{\sin(k-1)\alpha}{k-1} - \frac{\sin(k+1)\alpha}{k+1} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{\sin(k-1)(\alpha+\gamma)}{k-1} - \frac{\sin(k+1)(\alpha+\gamma)}{k+1} \right] = N'_k \cdot U_{cp0}. \quad (62)
\end{aligned}$$

Сравнивая полученные формулы с формулами (23) и (24), мы видим, что составляющие гармоники при угле регулирования α с учетом перекрытия определяются как полусуммы составляющих, которые получались бы при отсутствии перекрытия, когда угол регулирования был бы один раз α , а другой раз $\alpha + \gamma$.

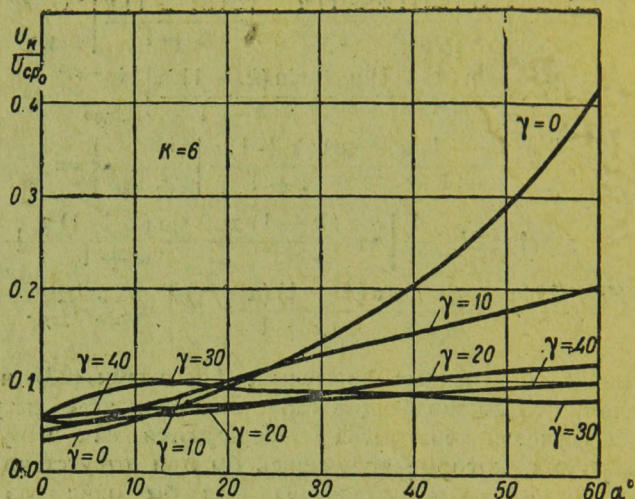
Для получения эффективных значений высших гармоник мы должны взять корень из суммы квадратов составляющих и разделить на корень из двух.

Не приводя здесь всех преобразований, выпишем конечную формулу:

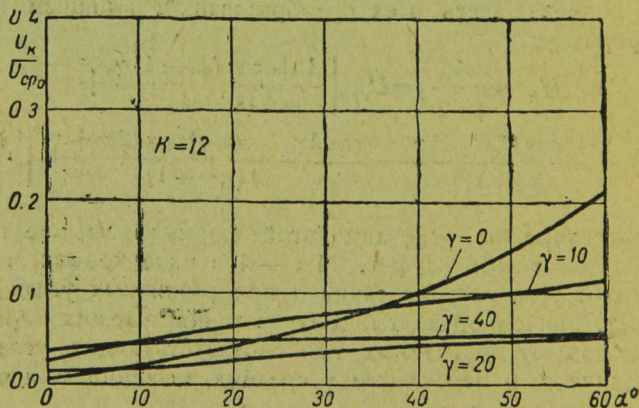
$$\begin{aligned}
U_k &= \frac{A_k}{\sqrt{2}} = U_{cp0} \left[\frac{1 + \cos(k-1)\gamma}{4(k-1)^2} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{1 + \cos(k+1)\gamma}{4(k+1)^2} - \frac{(\cos k\gamma + \cos \gamma) \cos(2\alpha + \gamma)}{2(k^2 - 1)} \right]^{1/2}. \quad (63)
\end{aligned}$$

Вычисленные на основании этой формулы высшие гармоники представлены на фиг. 21 а—д в виде кривых в зависимости от угла регулирования α при различных углах перекрытия γ , причем ординаты дают значения высших гармоник в процентах от получаемых при соответствующих углах регулирования α и перекрытия γ средних значений выпрямленного напряжения, т. е. U_{cp} .

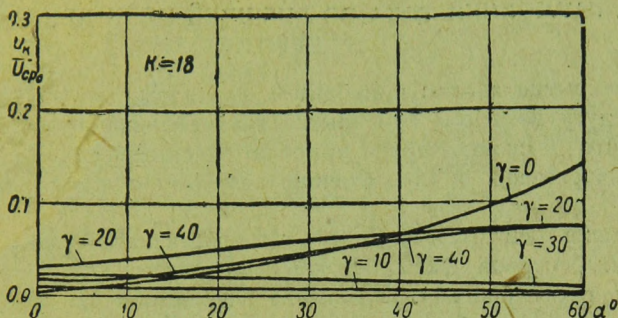
Как видно из кривых, мы имеем в результате перекрытия не относительное увеличение, а хотя и весьма малое, но все



Фиг. 21а. Эффективные значения шестых гармоник выпрямленного напряжения U_6 в долях наибольшего выпрямленного напряжения $U_{cр0}$ при различных α и γ .



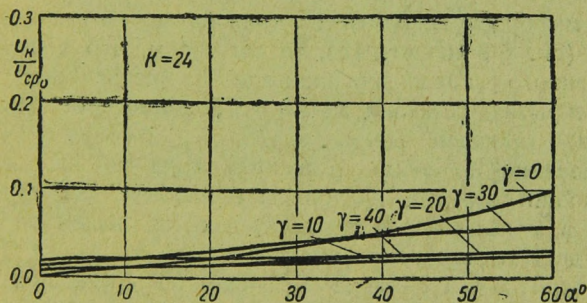
Фиг. 21б. Эффективные значения 12-х гармоник выпрямленного напряжения U_{12} в долях наибольшего выпрямленного напряжения $U_{cр0}$ при различных α и γ .



Фиг. 21с. Эффективные значения 18-х гармоник выпрямленного напряжения U_{18} в долях наибольшего выпрямленного напряжения U_{cp0} при различных α и γ .

же некоторое относительное уменьшение высших гармоник при больших углах перекрытия.

Это весьма странное на первый взгляд положение объясняется тем, что в результате перекрытия срезается часть



Фиг. 21d. Эффективные значения 24-х гармоник выпрямленного напряжения U_{24} в долях наибольшего выпрямленного напряжения U_{cp0} при различных α и γ .

кривой выпрямленного напряжения (которая получалась бы при отсутствии перекрытия), ординаты которой выше среднего выпрямленного напряжения.

11. ГАРМОНИКИ ТОКА ВО ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ ПРИ УЧЕТЕ ПЕРЕКРЫТИЯ

Перекрытие анодов приводит к параллельному соединению через дугу во время перекрытия двух сменяющих друг друга фаз, что в свою очередь приводит к снижению выпрямленного напряжения и к изменению величины общего реактанса цепи.

В схеме без отсасывающей катушки в начале вступления, положим, первой фазы перекрытыми оказываются шестая и первая фазы (фиг. 1). Уравнение напряжения для этого промежутка времени будет

$$e = \frac{e_6 + e_1}{2} = E + ir + (x + 0,5x_2) \frac{di}{du} \quad (64)$$

Когда же перекрытие закончится, это уравнение примет вид

$$e = e_1 = E + ir + (x + x_2) \frac{di}{du}. \quad (65)$$

Если мы будем исходить из кривой выпрямленного напряжения e (см. § 8 и фиг. 13), то мы видим, что в отношении выпрямленного напряжения приведенная цепь имеет в течение перекрытия реактанс $x + 0,5x_2$, а после окончания перекрытия — реактанс $x + x_2$.

Определение по этим уравнениям тока во внешней цепи как функции времени представляет необычайные трудности. Однако в отдельных частных случаях мы можем определить ток i с достаточной точностью.

Так, если $x + x_2$ весьма невелики по сравнению с r , то внешние гармоники тока могут быть приняты пропорциональными гармоникам напряжения:

$$I_6 = \frac{U_6}{r}, \quad I_{12} = \frac{U_{12}}{r}, \quad I_{18} = \frac{U_{18}}{r}, \dots$$

Равным образом, если реактанс внешней цепи во много раз больше реактанса трансформатора, $x \gg x_2$, мы можем

принять, что $x_a \approx x$ и

$$I_6 = \frac{U_6}{\sqrt{r^2 + 36x_a^2}}, \quad I_{12} = \frac{U_{12}}{\sqrt{r^2 + 144x_a^2}}.$$

В случае же, если x весьма мало или даже равно нулю, то мы можем определить пределы (максимум и минимум), между которыми заключаются высшие гармоники, считая один раз, что реактанс в приведенной цепи равен $x_a = x + 0,5x_2$, а другой раз $x_a = x + x_2$, и определяя значения гармоник для обоих этих крайних случаев.

Как некоторое достаточное приближение можно принять средний реактанс в соответствии с временем перекрытия

$$x_a = x + x_2 \left(1 - \frac{3\gamma}{2\pi}\right) = x + x_2 \left(1 - \frac{\gamma^\circ}{120^\circ}\right). \quad (66)$$

В схеме с двухфазной отсасывающей катушкой при переходе дуги с шестого на второй анод с одной стороны двухфазной катушки действует э. д. с. $\frac{e_6 + e_2}{2}$, а с другой — e_1 .

Уравнения равновесия для этих двух э. д. с. напишутся в виде ($i_6 + i_2 = i - i_1$)

$$\begin{aligned} \frac{e_6 + e_2}{2} = E + ir + x \frac{di}{du} + x_0 \frac{d(i - i_1)}{du} - \\ - x_0 \frac{di_1}{du} + \frac{x_2}{2} \frac{d(i - i_1)}{du}, \end{aligned} \quad (67)$$

$$e_1 = E + ir + x \frac{di}{du} + x_0 \frac{di_1}{du} - x_0 \frac{d(i - i_1)}{du} + x_2 \frac{di_1}{du}. \quad (68)$$

Исключаем из последних двух уравнений $\frac{di_1}{du}$:

$$\begin{aligned} \frac{e_6 + e_2}{2} (2x_0 + x_2) + e_1 (2x_0 + 0,5x_2) = \\ = \left(E + ir + x \frac{di}{du}\right) (4x_0 + 1,5x_2) + 0,5x_2 \frac{di}{du} (3x_0 + x_2). \end{aligned}$$

x_0 обыкновенно в 20÷100 раз больше x_2 , поэтому мы не сделаем большой ошибки (менее 0,5% при определении i), если в скобках отбросим x_2 , тогда мы получаем

$$e = \frac{\frac{e_6 + e_2}{2} + e_1}{2} = E + ir + (x + 0,375x_2) \frac{di}{du}. \quad (69)$$

Когда же кончится перекрытие, то будут действовать лишь фазы первая и вторая, и мы будем иметь уравнение (8)

$$e = \frac{e_1 + e_2}{2} = E + ir + (x + 0,5x_2) \frac{di}{du}. \quad (70)$$

Таким образом для определения пределов значений гармоник тока мы в уравнения (30) и (31) должны подставить один раз

$$x_a = x + 0,375x_2$$

и другой раз

$$x_a = x + 0,5x_2$$

или некоторый средний реактанс

$$x_a = x + 0,5x_2 \left(1 - \frac{3\gamma}{8\pi}\right) = x + 0,5x_2 \left(1 - \frac{\gamma^\circ}{480^\circ}\right). \quad (71)$$

При трехфазной отсасывающей катушке, когда дуга начинает переходить с одного анода на другой, например, с шестого на третий, э. д. с. этих двух фаз взаимно уравниваются, а потому для этих двух фаз и для внешней цепи мы можем написать ($i_6 + i_3 = i - i_1 - i_2$)

$$\begin{aligned} \frac{e_6 + e_3}{2} = 0 = E + ir + x \frac{di}{du} + \frac{x_0 d(i - i_1 - i_2)}{du} - \\ - 0,5x_0 \frac{d}{du} (i_1 + i_2) + 0,5x_2 \frac{d}{du} (i - i_1 - i_2). \end{aligned} \quad (72)$$

Для контуров, в которые входят фазы вторая и первая будут иметь силу уравнения (14) и (15). Складываем их:

$$e_1 + e_2 = 2 \left(E + ir + x \frac{di}{du} \right) - x_0 \frac{di}{du} + (1,5x_0 + x_2) \frac{d}{du} (i_1 + i_2) \quad (73)$$

и исключаем из полученных уравнений $\frac{d}{du} (i_1 + i_2)$:

$$(e_1 + e_2) \cdot (1,5x_0 + 0,5x_2) = \left(E + ir + x \frac{di}{du} \right) (4,5x_0 + 2x_2) + 0,5x_2 (2,5x_0 + x_2) \frac{di}{du}.$$

Если опять отбросить x_2 как величину, весьма малую по сравнению с x_0 , то во время перекрытия мы будем иметь

$$e = \frac{\frac{e_1 + e_2}{2} + e_1 + e_2}{3} = E + ir + \left(x + \frac{5}{6} \frac{x_2}{3} \right) \frac{di}{du}, \quad (74)$$

после окончания же перекрытия [см. уравнение (17)] —

$$e = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{3} = E + ir + \left(x + \frac{x_2}{3} \right) \frac{di}{du}. \quad (75)$$

При трехфазной катушке приведенный реактанс x_a , который мы должны ввести в приведенную цепь, состоящую из внешней цепи и некоторого эквивалентного источника тока с э. д. с., определяемой кривой выпрямленного напряжения, при учете перекрытия будет заключаться между

$$x_a = x + \frac{5}{6} \frac{x_2}{3}$$

и

$$x_a = x + \frac{x_2}{3}$$

или же мы можем остановиться на некотором среднем реактансе

$$x_a = x + \frac{x_2}{3} \left(1 - \frac{\gamma}{6\pi} \right) = x + \frac{x_2}{3} \left(1 - \frac{\gamma^\circ}{1080^\circ} \right).$$

Таким образом, если учитывать высшие гармоники, эффективное значение выпрямленного тока будет отличаться от среднего его значения. Это эффективное значение может быть выражено через

$$I = \sqrt{I_{cp}^2 + I_6^2 + I_{12}^2 + I_{18}^2 + \dots} \approx I_{cp} \left(1 + \frac{\varepsilon_{np}}{2} \right), \quad (76)$$

где ε_{np} — коэффициент волнистости, или пульсации, выпрямленного тока, представляющий собой отношение суммы эффективных значений высших гармоник во внешней цепи к среднему значению выпрямленного тока:

$$\varepsilon_{np} = \frac{I_6^2 + I_{12}^2 + I_{18}^2 + \dots}{I_{cp}^2}. \quad (77)$$

III. НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКИ В ОТСАСЫВАЮЩЕЙ КАТУШКЕ

12. ДВУХФАЗНАЯ ОТСАСЫВАЮЩАЯ КАТУШКА

Для определения токов i_1 и i_2 в отсасывающей катушке (фиг. 3), связанных уравнением $i = i_1 + i_2$, напомним уравнение напряжений для контура $Oa1K2bO$ или возьмем разность уравнений (6) и (7):

$$\begin{aligned} e &= \frac{e_1 - e_2}{2} = (x_2 + 2x_0) \frac{d}{du} \left(\frac{i_1 - i_2}{2} \right) = \\ &= 3(x_2 + 2x_0) \frac{d}{d3u} \left(i_1 - \frac{i}{2} \right). \end{aligned} \quad (78)$$

Если бы э. д. с. в двух горящих одновременно фазах были равны $e_1 = e_2$, то ток i во внешней цепи делился бы пополам между обеими половинами катушки:

$$i_1 = i_2 = \frac{i}{2}.$$

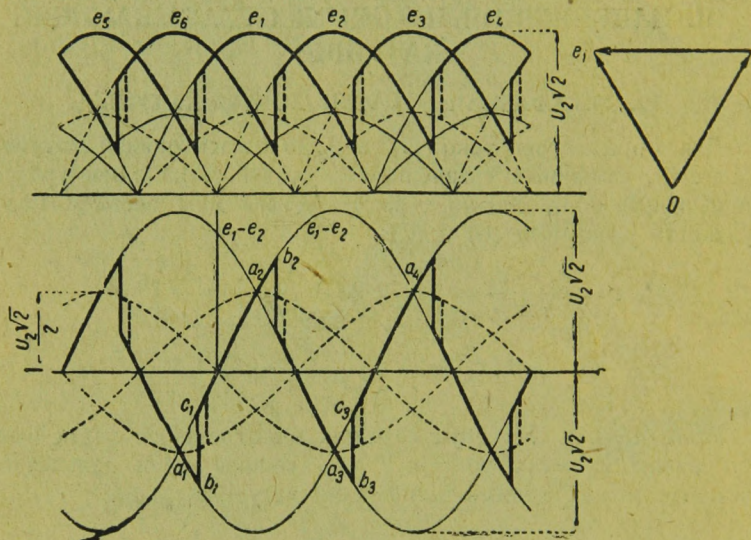
Вследствие же неравенства мгновенных значений э. д. с., действующих на концах катушки, возникают так называемые выравнивающие токи

$$i_1 - \frac{i}{2} = - \left(i_2 - \frac{i}{2} \right),$$

которые и выравнивают неодинаковые э. д. с. в горящих фазах по отношению к внешней цепи.

Разность $e_1 - e_2$ создает неравномерность в мгновенных нагрузках обеих звезд. На фиг. 22 (верхняя часть) толстыми линиями вычерчены кривые э. д. с., действующих при про-

хождении тока по ту и другую стороны катушки (в левой и в правой звездах). При переходе дуги с одного анода на другой э. д. с. e_1 сменяется e_3 , e_2 — э. д. с. e_4 и т. д. Разность $e_1 - e_2$ представлена в нижней части фиг. 22 кривой, которая состоит из отрезков синусоид с амплитудами, равным $U_2 \sqrt{2}$, так как сдвиг фаз между векторами синусоид e_1, e_2, e_3 равен 60° .



Фиг. 22. Кривая напряжения на концах двухфазной катушки.

При отсутствии регулирования $\alpha = 0$ и перекрытия $\gamma = 0$ напряжение $e_1 - e_2$ менялось бы по кривой $a_1 a_2 a_3 a_4$. При регулировании на угол α переход с одной синусоиды на другую сдвигается также на угол α , и мы получаем кривую $b_1 c_1 b_2 c_2 b_3 c_3$.

Кривая $e = \frac{e_1 - e_2}{2}$ при начале координат в точке O может быть представлена уравнением (ветвь $c_1 b_2$)

$$e = \frac{U_2 \sqrt{2}}{2} \sin u$$

в пределах от $u = \alpha - 30^\circ$ до $u = \alpha + 30^\circ$ и уравнением (ветвь $c_2 b_3$)

$$e = \frac{U_2 \sqrt{2}}{2} \sin(60^\circ - u)$$

в пределах от $u = \alpha + 30^\circ$ до $u = \alpha + 90^\circ$ и т. д.

Кривая эта имеет трехкратную периодичность ($f_3 = 3f = 150$ Hz) по сравнению с частотой сети ($f = 50$ Hz).

Изменения, вносимые в форму кривой перекрытием, показаны пунктиром, причем во время перекрытия кривая $e = \frac{e_1 - e_2}{2}$ будет также состоять из отрезков синусоид с ампли-

тудами $\frac{U_2 \sqrt{2}}{4}$.

В этом случае уравнение кривой $e = \frac{e_1 - e_2}{2}$ было бы

$$e = \frac{U_2 \sqrt{2}}{4} \sin(u - 60^\circ)$$

от $u = \alpha - 30^\circ$ до $u = \alpha + \gamma - 30^\circ$,

$$e = \frac{U_2 \sqrt{2}}{4} \sin u$$

от $u = \alpha + \gamma - 30^\circ$ до $u = \alpha + 30^\circ$

и

$$e = \frac{U_2 \sqrt{2}}{4} \cos(u - 30^\circ)$$

от $u = \alpha + 30^\circ$ до $u = \alpha + \gamma + 30^\circ$. (79)

Эту кривую можно разложить на гармоники. Так как ординаты этой кривой в первую и вторую половины изменяются, имея те же значения, но с обратными знаками, то кривая

будет содержать лишь нечетные высшие гармоники, т. е. частоты будут

$$f_3 = 3f = 150 \text{ Hz}; \quad f_9 = 3f_3 = 450 \text{ Hz}; \\ f_{15} = 5f_3 = 750 \text{ Hz}; \quad f_{21}, f_{27}, \dots$$

Не помещая здесь громоздких математических выкладок разложения, приведем лишь конечные результаты, которые проводятся подобным же образом, как это было сделано в § 6 формулы (23) и (24) или в § 11 формулы (61) и (62).

Эффективные значения гармоник кривой $e = \frac{e_1 - e_2}{2}$, представляющей разность действующих э. д. с. по обе стороны катушки, в случае отсутствия перекрытия определяются от среднего выпрямленного напряжения при угле α по формуле, совпадающей с формулой (26),

$$U_k = U_{cp} Q_k = U_{cp} \frac{\sqrt{2(k^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1)}}{k^2 - 1}. \quad (80)$$

Если же учитывать перекрытие, то эффективные значения гармоник выражаются в зависимости от максимального выпрямленного напряжения U_{cp0} следующим образом:

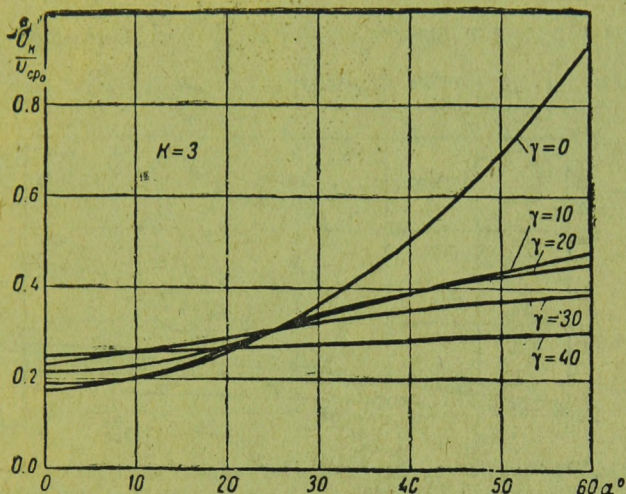
$$U_k = U_{cp} Q'_k = U_{cp0} \left[\frac{1 + \cos(k-1)\gamma}{4(k-1)^2} + \right. \\ \left. + \frac{1 + \cos(k+1)\gamma}{4(k+1)^2} - \frac{(\cos k\gamma + \cos \gamma) \cos(2\alpha + \gamma)}{2(k^2 - 1)} \right]^{1/2} \quad (81)$$

[ср. с формулой (63)].

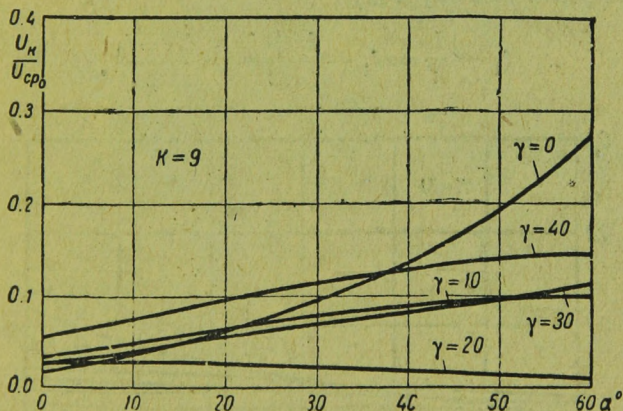
В этих формулах вместо k должно быть подставлено 3, 9, 15, 21, 27.

На фиг. 23 а—d даны значения U_k в процентах от $U_{cp} = U_{cp0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$ в зависимости от $\frac{U_{cp}}{U_{cp0}}$ при различных углах перекрытия $\gamma = 10^\circ$, $\gamma = 20^\circ$, $\gamma = 30^\circ$, ...

Как мы видим, перекрытие на величину гармоник большого влияния не оказывает.

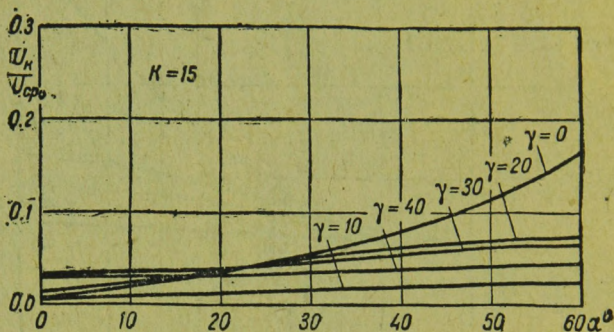


Фиг. 23а. Эффективные значения третьих гармоник напряжения двухфазной отсасывающей катушки U_3 в долях U_{cp0} при различных α и γ .



Фиг. 23б. Эффективные значения девятой гармоник напряжения двухфазной отсасывающей катушки U_9 в долях U_{cp0} при различных α и γ .

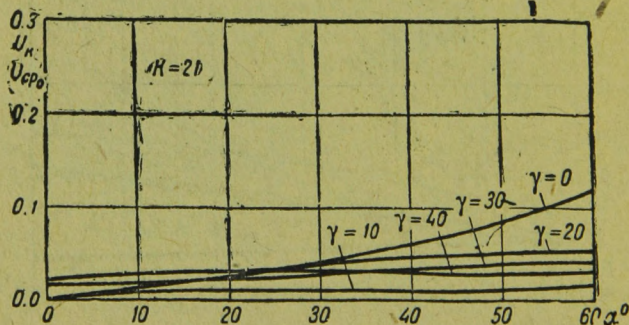
Зная гармоники напряжения $e = \frac{e_1 - e_2}{2}$, мы на основании уравнения (78) можем определить те дополнительные гармо-



Фиг. 23с. Эффективные значения 15-х гармоник напряжения двухфазной отсасывающей катушки U_{15} в долях U_{cp0} при различных α и γ .

ники, которые появляются в отсасывающей катушке благодаря выравнивающему току

$$i_1 - \frac{i}{2} = i_1 - \frac{i_1 + i_2}{2} = \frac{i_1 - i_2}{2}.$$



Фиг. 23d. Эффективные значения 21-х гармоник двухфазной отсасывающей катушки U_{21} в долях U_{cp0} при различных α и γ .

Эффективные значения выпрямленного тока будут

$$I_3 = \frac{U_3}{3(x_2 + 2x_0)}; \quad I_9 = \frac{U_9}{9(x_2 + 2x_0)}; \\ I_{15} = \frac{U_{15}}{15(x_2 + 2x_0)}; \dots \quad (82)$$

Во всех этих формулах мы можем отбросить x_2 как величину, весьма малую по сравнению с $2x_0$.

Таким образом ток в отсасывающей катушке будет состояться из половины среднего значения выпрямленного тока во внешней цепи и из гармонических слагающих

$$\frac{I_{cp}}{2}, \quad I_3, \quad \frac{I_6}{2}, \quad I_9, \quad \frac{I_{12}}{2}, \quad I_{15}, \quad \frac{I_{18}}{2}, \dots,$$

где $I_6, I_{12}, I_{18}, \dots$ — эффективные значения гармоник во внешней цепи. Поэтому действующее значение тока в отсасывающей катушке будет

$$I_{кат} = \sqrt{\frac{I_{cp}^2}{4} + I_3^2 + \frac{I_6^2}{4} + I_9^2 + \frac{I_{12}^2}{4} + \dots} = \\ = \frac{I_{cp}}{2} \sqrt{1 + \epsilon_{кат}} \approx \frac{I_{cp}}{2} \left(1 + \frac{\epsilon_{кат}}{2}\right). \quad (83)$$

Коэффициент $\epsilon_{кат}$ можно рассматривать как коэффициент волнистости тока в отсасывающей катушке

$$\epsilon_{кат} = \frac{\sqrt{I_{кат}^2 - \frac{I_{cp}^2}{4}}}{\frac{I_{cp}}{2}} = \sqrt{\left(\frac{2I_{кат}}{I_{cp}}\right)^2 - 1}. \quad (84)$$

13. ТРЕХФАЗНАЯ ОТСАСЫВАЮЩАЯ КАТУШКА

Если бы э. д. с. во всех трех фазах (положим 1, 2, 3), присоединенных к концам трехфазной катушки, через которые в данный момент проходит ток (фиг. 5), совпадали бы

по величине, то i — ток во внешней цепи — делился бы на три равные части $\frac{i}{3}$ между фазами трехфазной катушки.

Благодаря же неравенству мгновенных значений э. д. с., ток, например, в первой фазе катушки i_1 будет отличаться от мгновенного значения $\frac{i}{3}$.

Разность $i_1 - \frac{i}{3}$ представляет собой тот (дополнительный) выравнивающий или намагничивающий ток, который выравнивает э. д. с. действующих фаз по отношению к внешней цепи.

Для определения выравнивающего тока

$$i_1 - \frac{i}{3} = \frac{3i_1 - (i_1 + i_2 + i_3)}{3} = \frac{2}{3} \left(i_1 - \frac{i_2 + i_3}{2} \right)$$

мы из уравнения (14)

$$e_1 = E + ir + x \frac{di}{du} + x_2 \frac{di_1}{du} + 0,5x_0 \frac{d}{du} (3i_1 - i)$$

вычтем полусумму уравнений (15) и (16):

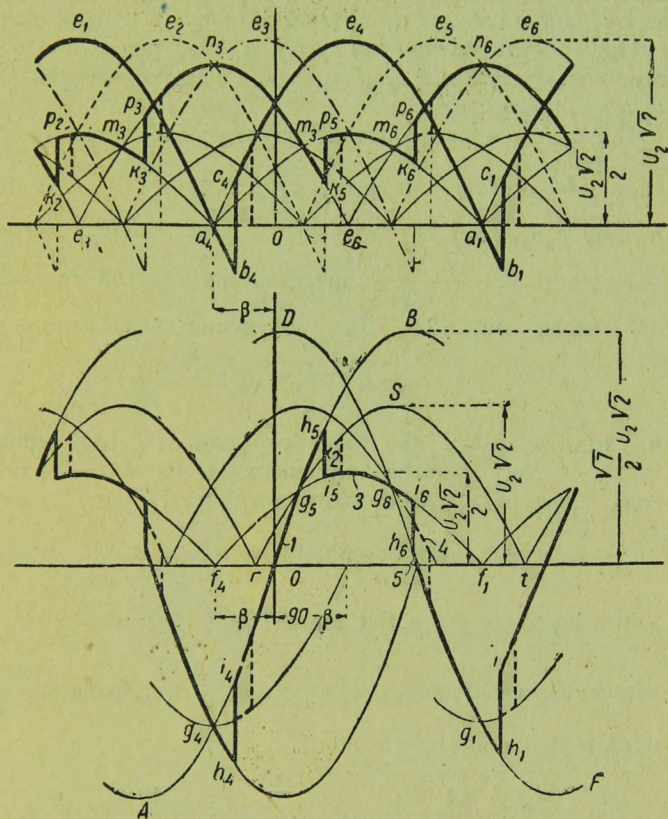
$$\begin{aligned} \frac{e_2 + e_3}{2} = E + ir + x \frac{di}{du} + x_2 \frac{d}{du} \left(\frac{i_2 + i_3}{2} \right) + \\ + 0,5x_0 \frac{d}{du} \left[\frac{3(i_2 + i_3)}{2} - i \right] \end{aligned}$$

и возьмем $\frac{2}{3}$ от соответствующей разности:

$$\begin{aligned} e = \frac{2}{3} \left(e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2} \right) = (x_2 + 1,5x_0) \frac{d}{du} \left(i_1 - \frac{i}{3} \right) = \\ = (2x_2 + 3x_0) \frac{d}{d2u} \left(i_1 - \frac{i}{3} \right). \end{aligned} \quad (85)$$

Кривая $e = \frac{2}{3} \left(e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2} \right)$ представляет собой две трети разности между э. д. с. одной фазы (первой) и полусуммой э. д. с. двух других одновременно горящих фаз (e_2 и e_3).

На фиг. 24 (верхняя половина) толстыми линиями вычерчены с одной стороны э. д. с. e_1 , действующая на одном конце трехфазной катушки, а с другой — полусумма э. д. с. двух



Фиг. 24. Кривая напряжения $e_1 = \frac{e_2 - e_3}{2}$, пропорционального напряжению у трехфазной катушки.

других одновременно горящих фаз. При переходе дуги с одного анода на другой фаза первая сменяется фазой четвертой, фаза вторая — фазой пятой, третья — фазой шестой и т. д.

Когда нет регулирования и перекрытия ($\alpha = 0$ и $\gamma = 0$), э. д. с. в фазе трансформатора, находящейся с одной стороны катушки, будет определяться кривой $e_1 a_4 e_4 a_1 \dots$, а полусумма э. д. с., действующих по другую сторону, — кривой $m_3 n_3 m_5 m_6 n_6$.

При регулировании на угол α мы будем иметь с одной стороны кривую $e_1 b_4 c_4 e_4 b_1 c_1 \dots$, а с другой стороны — кривую $k_2 p_2 k_3 p_3 k_5 p_5 k_6 p_6 n_6 \dots$.

Последняя кривая состоит из отрезков синусоид с амплитудами $\frac{U_2 \sqrt{2}}{2}$ (отрезки $p_2 k_3$, $p_5 k_6$, ...) и $\frac{\sqrt{3}}{2} U_2 \sqrt{2}$ (отрезки $p_3 n_3 k_5$, $p_6 n_6$, ...).

Разность $e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2}$ представлена толстой кривой на нижней части фиг. 24. Для получения надлежащих значений

$$e = \frac{2}{3} \left(e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2} \right)$$

мы должны взять две трети от ординаты этой кривой. Она также состоит из отрезков синусоид. Разность ординат синусоид $a_4 e_4 a_1$ и $a_4 m_3 m_6 a_1$ дает синусоиду $f_4 g_5 g_6 f_1$ с амплитудой

$\frac{U_2 \sqrt{2}}{2}$, а разность ординат синусоид $a_4 e_4 a_1$ и $e_3 m_3 n_3 m_5 e_6$

дает синусоиду $A g_4 g_5 B$ с амплитудой, равной $\frac{\sqrt{7}}{2} U_2 \sqrt{2}$, так

как векторы синусоид $a_4 e_4 a_1$ и $e_3 m_3 n_3 m_5 e_6$, равные $\frac{\sqrt{3}}{2} U_2 \sqrt{2}$

и $U_2 \sqrt{2}$, сдвинуты на 90° :

$$\sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + (1)^2} U_2 \sqrt{2} = \frac{\sqrt{7}}{2} U_2 \sqrt{2}.$$

Когда нет регулирования и перекрытия анодов, $\alpha = 0$ и $\gamma = 0$, значения $e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2}$ будут изменяться по кривой $g_4 g_5 g_6 g_1 \dots$.

При регулировании на угол α переход кривой с одной синусоиды на другую смещается на угол α , и мы получаем кривую $g_4 h_4 i_4 g_5 h_5 i_5 h_6 h_1$.

Влияние перекрытия на форму кривой показано пунктиром. Во время перекрытия ординаты кривой перемещаются по синусоидам rst с амплитудой $U_2 \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$.

Кривая $e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2}$ имеет двойную периодичность, $f_2 = 2f = 100 \text{ Hz}$, и несимметрична за первую и за вторую половины периода. При разложении на гармоники она будет содержать лишь гармоники четного порядка по отношению к основной частоте.

Напишем уравнение искомой кривой $\frac{2}{3} \left(e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2} \right)$ относительно точки O — точки пересечения кривой с осью абсцисс. Расстояние точки O относительно точки f_4 или a_4 определяется из уравнения

$$e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2} = U_2 \sqrt{2} \sin \beta - \frac{\sqrt{3}}{2} U_2 \sqrt{2} \cos \beta,$$

откуда

$$\beta = \arctg \frac{\sqrt{3}}{2} = 40^\circ 53,6' \approx 41^\circ.$$

Уравнение искомой кривой будет

$$e = \frac{2}{3} \left(e_1 - \frac{e_2 + e_3}{2} \right) = \frac{\sqrt{7}}{3} U_2 \sqrt{2} \sin u \quad (86)$$

от $u = \alpha - \beta$ до $u = 60^\circ + \alpha - \beta$ (синусоида AOB),

$$e = \frac{1}{3} U_2 \sqrt{2} \sin(u + \beta)$$

от $u = 60^\circ + \alpha - \beta$ до $u = 120^\circ + \alpha - \beta$ (синусоида $f_4 g_5 g_6 f_1$)
и

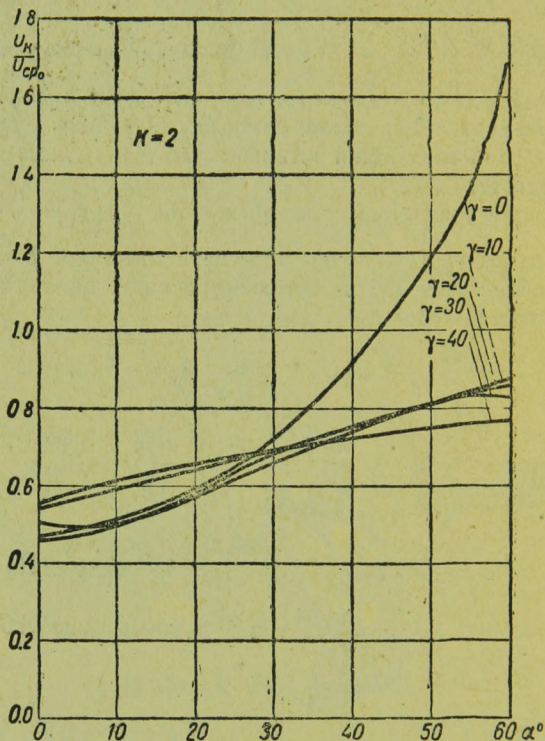
$$\begin{aligned} e &= \frac{\sqrt{7}}{3} U_2 \sqrt{2} \sin(180^\circ - 2\beta - u) = \\ &= \frac{\sqrt{7}}{3} U_2 \sqrt{2} \sin(u + 2\beta) \end{aligned}$$

от $u = 120^\circ + \alpha - \beta$ до $u = 180^\circ + \alpha - \beta$ (синусоида $Dh_6 F$).

Разложение этой кривой в тригонометрический ряд (ряд Фурье) дает для эффективных значений отдельных гармоник

формулу, в точности совпадающую с формулой (80), в которой вместо k должно быть подставлено $k=2, 4, 8, 10, 14, \dots$

Гармоники, кратные 6, при этом разложении выпадают.

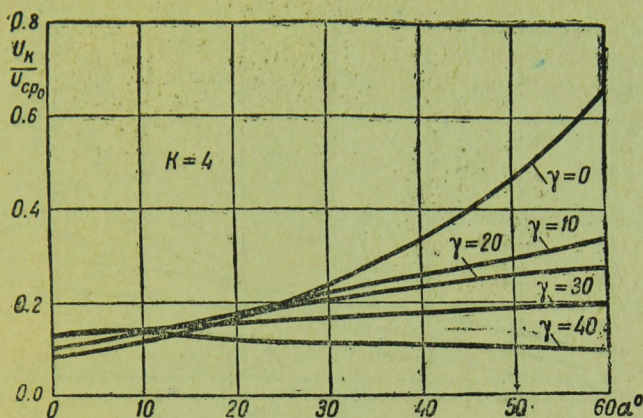


Фиг. 25а. Эффективные значения вторых гармоник напряжения трехфазной отсасывающей катушки U_2 в долях U_{cp0} при различных α и γ .

Соответствующие значения эффективных значений гармоник в процентах от выпрямленного среднего напряжения, т. е. от

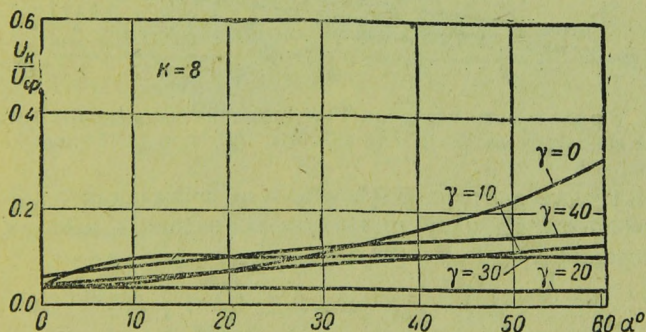
$$U_{cp} = \frac{3}{\pi} E_m \cos \alpha = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha = U_{cp0} \cos \alpha,$$

представлены на фиг. 25а—е.

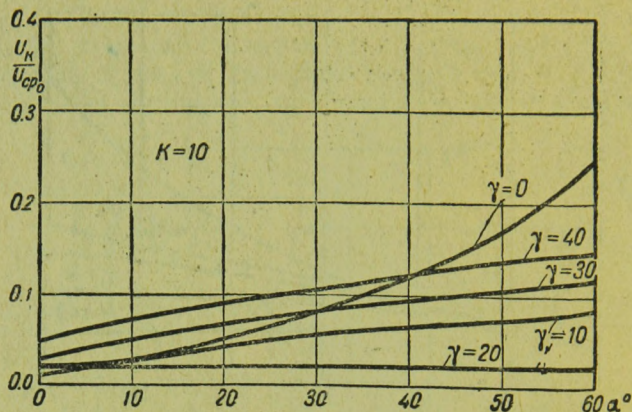


Фиг. 25b. Эффективные значения четвертых гармоник напряжения трехфазной отсасывающей катушки U_4 в долях U_{cp0} при различных α и γ .

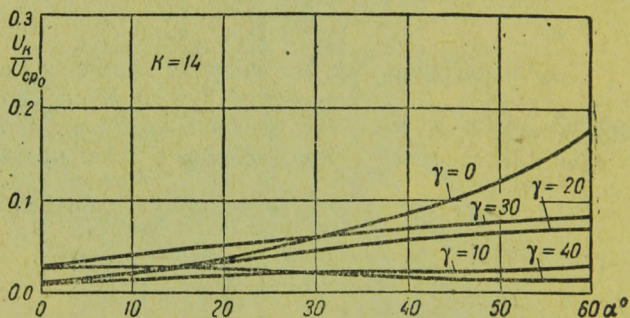
Если учесть перекрытие, то мы получим формулу, совпадающую с формулой (81), где опять вместо k мы должны подставить $k=2, 4, 8, 10, 14$. Значения гармоник при разных γ в зависимости от U_{cp0} представлены в виде кривых на тех же фиг. 25а—е.



Фиг. 25с. Эффективные значения восьмых гармоник напряжения трехфазной отсасывающей катушки U_8 в долях U_{cp0} при различных α и γ .



Фиг. 25d. Эффективные значения десятых гармоник напряжения трехфазной отсасывающей катушки U_{10} в долях U_{cp0} при различных α и γ .



Фиг. 25e. Эффективные значения 14-х гармоник напряжения трехфазной отсасывающей катушки U_{14} в долях U_{cp0} при различных α и γ .

Эффективные значения гармоник выравнивающих токов, накладываются на одну треть тока во внешней цепи, будут [на основании уравнения (84)]

$$I_2 = \frac{U_{k=2}}{2x_2 + 3x_0} \approx \frac{U_{k=2}}{3x_0};$$

$$I_4 \approx \frac{U_4}{6x_0}; \quad I_8 \approx \frac{U_8}{12x_0}, \quad (87)$$

а эффективное значение всего тока в отсасывающей катушке

$$I_{kam} = \sqrt{\frac{I_{cp}^2}{9} + I_2^2 + I_4^2 + \frac{I_6^2}{9} + I_8^2 + \dots} = \\ = \frac{I_{cp}}{3} \sqrt{1 + \epsilon_{kam}} \approx \frac{I_{cp}}{3} \left(1 + \frac{\epsilon_{kam}}{2}\right). \quad (88)$$

Здесь ϵ_{kam} представляет собой коэффициент волнистости тока в трехфазной катушке:

$$\epsilon_{kam} = \frac{\sqrt{I_{kam}^2 - \frac{I_{cp}^2}{9}}}{\frac{I_{cp}}{3}}. \quad (89)$$

14. РАСЧЕТ ДВУХФАЗНОЙ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ КАТУШКИ

Расчет отсасывающей катушки (как и всякой катушки), содержащей железо, состоит, с одной стороны, в расчете магнитной цепи, т. е. в определении размеров сердечника и числа витков, а с другой стороны — в определении сечения витков. Размеры сечения витков предопределяются эффективными значениями проходящих через эти витки токов, которые определяются формулами (83) и (87).

Для расчета магнитной цепи необходимо знать максимальное мгновенное значение магнитного потока.

Это максимальное значение магнитного потока пропорционально интегралу э. д. с. за время, когда э. д. с. имеет одно и то же направление

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}.$$

Так как, когда $e = 0$, магнитный поток Φ имеет максимум, то в предположении, что магнитный поток меняется между $\pm \Phi_{max}$, имеем, что

$$\int_{-\Phi_{max}}^{+\Phi_{max}} d\Phi = \frac{10^8}{\omega} \int_{e=0}^{e=0} e dt = \frac{10^8}{\omega\omega} \int_{e=0}^{e=0} e du, \quad (90)$$

или

$$\Phi_{\max} = \frac{10^8}{2\omega\omega} \int_{e=0}^{e=0} e \, du. \quad (90a)$$

Напряжение на концах одной половины двухфазной отсасывающей катушки имеет трехкратную частоту, и если бы напряжение это изменялось по закону синуса, то между ее эффективным значением и максимальным магнитным потоком имело бы место следующее соотношение:

$$U_{\text{кат}} = 4,44 \cdot 3f\omega \Phi_{\max} \cdot 10^{-8} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot 3f\omega \Phi_{\max} \cdot 10^{-8}, \quad (91)$$

или, на основании уравнения (90) и так как $2\pi f = \omega$,

$$U_{\text{кат}} = \frac{3}{2\sqrt{2}} \int_{e=0}^{e=0} e \, du. \quad (91a)$$

Интегрируя э. д. с., наводимую в одной половине отсасывающей катушки, по времени или по u , мы получим следующее значение расчетного напряжения (при тройной частоте) для двухфазной катушки в пределах, когда $\alpha + u < 30^\circ$ [см. фиг. 22 и уравнение (79)],

$$\begin{aligned} U_{\text{кат}} &= \frac{3}{2\sqrt{2}} \int_{e=0}^{e=0} e \, du = \frac{3}{2\sqrt{2}} \left[\int_0^{\alpha+30^\circ} \frac{U_2 \sqrt{2}}{2} \sin u \, du + \right. \\ &+ \int_{\alpha+30^\circ}^{\alpha+\gamma+30^\circ} \frac{U_2 \sqrt{2}}{4} \sin(u+60^\circ) \, du + \int_{\alpha+\gamma+30^\circ}^{60^\circ} \frac{U_2 \sqrt{2}}{2} \sin(u+120^\circ) \, du \left. \right] = \\ &= \frac{3}{4} U_2 \left\{ 2 - \frac{\sqrt{3}}{2} [\cos \alpha + (\alpha + \gamma)] \right\}. \quad (92) \end{aligned}$$

Когда $\alpha + u > 30^\circ$, то точки пересечения кривой напряжения (фиг. 22) с осью абсцисс получаются правее точки O ,

и для расчетного напряжения мы получаем следующее выражение:

$$U_{кат} = \frac{3}{2\sqrt{2}} \int_{e=0}^{e=0} e \, du = \frac{3}{2\sqrt{2}} \left[\int_{\alpha+\gamma-30^\circ}^{\alpha+\gamma+30^\circ} \frac{U_2 \sqrt{2}}{2} \sin u \, du + \int_{\alpha+30^\circ}^{\alpha+\gamma+30^\circ} \frac{U_2 \sqrt{2}}{4} \sin(u + 60^\circ) \, du \right] = \frac{3}{4} U_2 \left[\sin(\alpha + \gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha + \gamma) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \right]. \quad (93)$$

На фиг. 26 представлены расчетные значения (при тройной частоте) напряжений одной половины двухфазной катушки в процентах от U_2 — фазового напряжения вторичной обмотки трансформатора — в зависимости от угла регулирования и при различных углах перекрытия, подсчитанные на основе вышеприведенных формул. Как мы видим, значение напряжения на концах катушки увеличивается весьма значительно (почти вдвое) при регулировании в пределах от нуля до 60° . Перекрытие вначале увеличивает эти напряжения, при углах же α больше 50° наблюдается некоторое уменьшение этого увеличения напряжения.

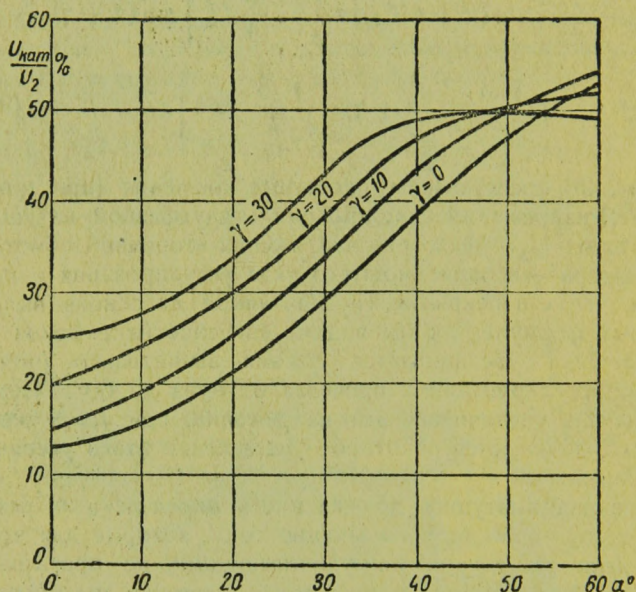
Отсасывающая катушка должна иметь определенный реактанс для того, чтобы выравнивающие токи, которые для этой катушки являются токами намагничивающими, не превышали определенной доли номинального тока. Через x_0 мы обозначили реактанс одной половины отсасывающей катушки при нормальной частоте, когда ток в другой половине равен нулю. Так как намагничение стержня производится одновременно токами в обеих обмотках катушки, то, учитывая это обстоятельство, а также тройную частоту, мы получаем следующее соотношение между расчетным напряжением, реактансом одной половины катушки и намагничивающим током: $I_\mu = \frac{U_{кат}}{2 \cdot 3x_0}$.

Выравнивающие токи определяются по своей величине преимущественно третьей гармоникой.

Поэтому эффективное значение намагничивающего тока этой катушки (при тройной частоте) должно равняться

$$I_{\mu} \approx I_{\alpha} \approx \frac{U_{кат}}{6x_0}. \quad (94)$$

Намагничивающее действие постоянных слагающих токов в обеих половинах катушки взаимно уравнивается. За-



Фиг. 26. Расчетные напряжения двухфазной катушки в процентах от напряжения трансформатора U_2 .

даваясь определенным процентом I_{μ} или I_3 по отношению к $\frac{I_{cp}}{2}$, мы получаем, таким образом, кроме найденного выше напряжения на концах $U_{кат}$ также и величину намагничивающего тока (при тройной частоте). Этих двух величин вполне достаточно для расчета двухфазной отсасывающей катушки. Обмотка катушки должна быть рассчитана на пропуск тока $I_{кат}$.

Расчетная мощность двухфазной отсасывающей катушки, учитывая тройную частоту, будет

$$P_{кат} = \frac{1}{3} U_{кат} I_{кат}. \quad (95)$$

От величины выбранного значения намагничивающего тока зависит положение точки перегиба внешней характеристики установки с ртутным выпрямителем (фиг. 19). Если нагрузка меньше $I_{\mu} \sqrt{2}$, то точка кривой, соответствующая этому режиму, будет лежать левее точки перегиба.

15. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ КАТУШКИ

В трехфазной отсасывающей катушке выравнивающие токи, налагающиеся на постоянную слагающую $\frac{I_{cp}}{3}$, имеют двойную частоту. Напряжения, наводимые в обмотке одного стержня этими выравнивающими токами при синусоидальном их изменении, но при том же магнитном потоке, т. е. расчетные напряжения, будут [см. уравнения (90) и (91)]

$$\begin{aligned} U_{кат} &= 4,44 \cdot 2f\omega \Phi_{\max} \cdot 10^{-8} = \\ &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot 2f\omega \Phi_{\max} \cdot 10^{-8} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{e=0}^{e=0} e \, du. \end{aligned} \quad (96)$$

Значения интеграла $\int e \, du$ по u за время, когда э. д. с. имеет одно и то же направление, зависит как от угла регулирования, так и от угла перекрытия.

Кривую напряжения одной фазы трехфазной катушки можно разбить на отдельные участки (фиг. 24), ординаты которых могут быть представлены следующими уравнениями:

$$\text{участок № 1: } e = \frac{\sqrt{7}}{3} U_2 \sqrt{2} \sin u$$

справедливо в пределах от 0 до $(60^\circ - \beta + \alpha)$;

$$\text{участок № 2: } e = \frac{\sqrt{3}}{3} U_2 \sqrt{2} \sin(u + \beta - 30^\circ)$$

справедливо в пределах от $(60^\circ - \beta + \alpha)$ до $(60^\circ - \beta + \alpha + \gamma)$;

$$\text{участок № 3: } e = \frac{1}{3} U_2 \sqrt{2} \sin(u + \beta)$$

справедливо в пределах от $(60^\circ - \beta + \alpha + \gamma)$ до $(120^\circ - \beta + \alpha)$;

$$\text{участок № 4: } e = \frac{\sqrt{3}}{3} U_2 \sqrt{2} \sin(u + \beta + 30^\circ)$$

справедливо в пределах от $(120^\circ - \beta + \alpha)$ до $(120^\circ - \beta + \alpha + \gamma)$;

$$\text{участок № 5: } e = \frac{\sqrt{7}}{3} U_2 \sqrt{2} \sin(u + 2\beta)$$

справедливо в пределах от $(120^\circ - \beta + \alpha + \gamma)$ до $(\alpha - \beta + 180^\circ)$;

$$\text{участок № 6: } e = \frac{\sqrt{7}}{3} U_2 \sqrt{2} \sin(90^\circ + \beta + u)$$

справедливо в пределах от $(\alpha - \beta + 180^\circ)$ до $(\alpha - \beta + \gamma + 180^\circ)$. (97)

Интегрирование уравнения

$$U_{\text{кат}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{e=0}^{e=0} e \, du,$$

проведенное для семи различных случаев, приводит к следующим результатам:

случай 1: $\alpha + \gamma < 19^\circ$

$$U_{\text{кат}} = \frac{2}{3} U_2 [\sqrt{7} - \cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)];$$

случай 2: $\alpha + \gamma > 19^\circ$; $\alpha + \gamma < 30^\circ$

$$U_{\text{кат}} = \frac{1}{3} U_2 [\sqrt{7} - 2 \cos \alpha + \sin(\alpha + \gamma + 30^\circ)];$$

случай 3: $\alpha < 30^\circ$; $30^\circ < \alpha + \gamma < 41^\circ$

$$U_{кат} = \frac{1}{3} U_2 [\sqrt{7} + \sqrt{3} - 2 \cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)];$$

случай 4: $\alpha < 30^\circ$; $\alpha + \gamma > 41^\circ$

$$U_{кат} = \frac{1}{3} U_2 [\sqrt{3} - 2 \cos \alpha + 2 \sin (\alpha + \gamma + 30^\circ)];$$

случай 5: $\alpha > 30^\circ$; $\alpha + \gamma < 41^\circ$

$$U_{кат} = \frac{1}{3} U_2 [\sqrt{7} - \sin (30^\circ - \alpha) - \cos (\alpha + \gamma)];$$

случай 6: $60^\circ > \alpha > 30^\circ$; $60^\circ > \alpha + \gamma > 41^\circ$

$$U_{кат} = \frac{1}{3} U_2 [2 \sin (\alpha + \gamma + 30^\circ) - \sin (30^\circ - \alpha)];$$

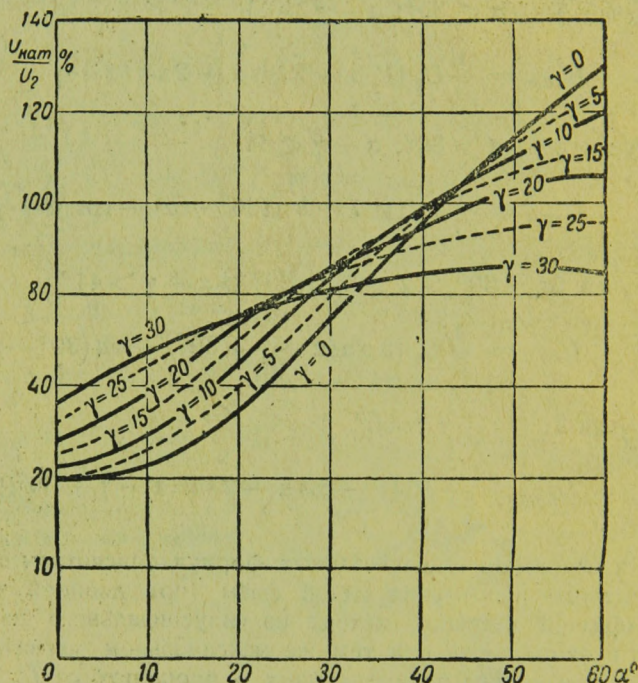
случай 7: $\alpha + \gamma > 60^\circ$

$$U_{кат} = \frac{1}{3} U_2 [1 - \cos \alpha + 2 \sin (\alpha + \gamma + 30^\circ)]. \quad (98)$$

На основании вышеуказанных формул подсчитаны значения расчетного напряжения одной фазы (при двойной частоте) трехфазной катушки, исходя из синусоидального изменения этого напряжения при том же максимальном магнитном потоке, и нанесены в виде кривых в процентах от U_2 в зависимости от угла регулирования при разных углах перекрытия на фиг. 27. Как видно из этих кривых, наибольшие изменения напряжения при регулировании мы имеем, когда углы перекрытия невелики. Напряжения эти увеличиваются при регулировании от $\alpha = 0$ до $\alpha = 60^\circ$ до трехкратной величины. При больших углах перекрытия вначале мы имеем увеличенные значения $U_{кат}$, которые при регулировании возрастают в случае больших углов перекрытия уже в меньшей степени.

Так как через каждую обмотку трехфазной катушки кроме выравнивающих токов проходит еще одна треть тока внешней

цепи $\frac{i}{3}$, который во всех обмотках имеет одну и ту же фазу, то, для того чтобы скомпенсировать намагничивающие действия этих слагающих, во избежание постоянного намагни-



Фиг. 27. Расчетные напряжения для трехфазных катушек в процентах от напряжения трансформатора U_2 .

чивания железа следует применять зигзагообразную обмотку, располагая обмотку каждой фазы двумя равными частями на двух стержнях в обратном направлении (фиг. 28).

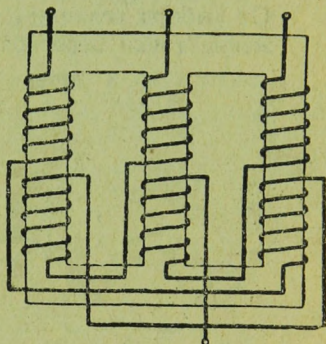
При таком соединении наводимая э. д. с. уменьшается в отношении $\frac{\sqrt{3}}{2}$, и мы получаем следующее соотношение ме-

жду расчетным напряжением, числом витков и магнитным потоком (при двойной частоте):

$$U_{кат} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\pi}{\sqrt{2}} 2f\omega \Phi_{max} 10^{-8} =$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}} 2\pi f\omega \Phi_{max} 10^{-8}. \quad (99)$$

Для получения реактанца x_0 мы должны учесть, что при двойной частоте реактанц одной фазы, когда токи в двух других равны нулю, будет равен $2x_0$. Кроме того, взаимный реактанц каждой из двух других фаз будет равен половине этой величины, т. е. x_0 , а так как сумма выравнивающих токов в двух других фазах равна и противоположна выравнивающему току в рассматриваемой фазе, то общий реактанц одной фазы, т. е. отношение напряжения одной фазы к действующему значению выравнивающего тока в этой фазе, будет равно $3x_0$. Падением напряжения во вторичной обмотке трансформатора мы пренебрегаем. Без большой погрешности выравнивающий ток мы можем приравнять второй гармонике:



Фиг. 28. Схема соединения обмоток трехфазной отсасывающей катушки.

$$I_{\mu} \approx I_2 \approx \frac{U_{кат}}{3x_0}. \quad (100)$$

При определении намагничивающей силы мы должны учесть, что обмотки соединяются в зигзаг, а потому намагничивающая сила одного стержня будет

$$AW = I_{\mu} \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \omega. \quad (101)$$

Обмотки трехфазной катушки должны быть рассчитаны на пропуск тока

$$I_{кат} = \sqrt{\frac{I_{ср}^2}{9} + I_2^2 + I_4^2 + \frac{I_6^2}{9} + I_8^2 + \dots}$$

Типовая мощность трехфазной катушки при учете двойной частоты и наличия на каждом стержне лишь одной обмотки составит

$$P_{кат} = \frac{3}{4} U_{кат} I_{кат}.$$

От выбора величины намагничивающего тока зависит и положение точки перегиба характеристики выпрямителя.

до окончательного его перехода на этот анод. Ординаты этой кривой будут изменяться по следующему закону [см. уравнение (38)]:

$$i_{an} = \frac{I_{cp} \cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{m \cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)}, \quad (102)$$

где $m = 1$ для шестифазной схемы без отсасывающей катушки; $m = 2$ для схемы с двухфазной катушкой и $m = 3$ для схемы с трехфазной катушкой; u — время, выраженное в углах, считая с момента зажигания дуги у этого анода.

Затем вторая часть кривой будет протекать прямолинейно с постоянной ординатой

$$i_{an} = \frac{I_{cp}}{m} \quad (103)$$

на протяжении угла $\frac{2\pi m}{6} - \gamma$.

И наконец, в третьей своей части кривая представляет собой убывание анодного тока, который может быть выражен через

$$i_{an} = \frac{I_{cp}}{m} - \frac{I_{cp}}{m} \cdot \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)}, \quad (104)$$

где u считается опять с момента перехода дуги с этого анода на следующий, эта часть кривой, как и первая ветвь, тянется в угловых единицах на протяжении от O до γ .

Определим эффективное значение анодного тока

$$\begin{aligned} I_{an} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_{an}^2 du} = \\ &= \frac{I_{cp}}{m} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{m\pi}{3} + 2 \int_0^{\gamma} \left[\frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} \right]^2 du - \right.} \\ &\quad \left. - \int_0^{\gamma} \frac{2 [\cos \alpha - \cos(\alpha + u)]}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} du \right\}} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{I_{cp}}{m} \sqrt{\frac{m}{6} - \phi(\alpha, \gamma)} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{6m}} \sqrt{1 - \frac{6}{m} \phi(\alpha, \gamma)} = \\
 &= \frac{I_{cp}}{\sqrt{6m}} g,
 \end{aligned} \tag{105}$$

где

$$\begin{aligned}
 \phi(\alpha, \gamma) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\gamma} \left\{ \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} - \right. \\
 &\quad \left. - \left[\frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} \right]^2 \right\} du = \\
 &= \frac{[2 + \cos(2\alpha + \gamma)] \sin \gamma - \gamma [1 + \cos(2\alpha + \gamma) + \cos \gamma]}{2\pi [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]^2}.
 \end{aligned} \tag{106}$$

Для удобства вычислений, затрудняемых тем, что в числитель и знаменатель входят разности, последнее выражение может быть представлено в следующем виде:

$$\phi(\alpha, \gamma) = \frac{\gamma}{6\pi} \left\{ 1 + \frac{\gamma^2}{30} - \frac{\gamma^2 + \frac{\gamma^4}{42}}{10 [1 - \cos(2\alpha + \gamma)]} \right\}, \tag{107}$$

где угол γ должен быть подставлен в дуговых единицах.

На фиг. 30 приведены кривые, дающие для $m=1$, $m=2$ и $m=3$ значения функции

$$g = \sqrt{1 - \frac{6}{m} \phi(\alpha, \gamma)}, \tag{108}$$

представляющей собой степень уменьшения анодного тока в результате перекрытия при различных углах регулирования.

Как видно из кривой, регулирование при сохранении угла перекрытия сравнительно мало влияет на значение функций $\phi(\alpha, \gamma)$, и следовательно, и на эффективное значение анодного тока, но если учесть (см. § 8 и фиг. 17), что с увеличением угла регулирования уменьшается угол перекрытия, то оказывается, что с увеличением угла регулирования

немного уменьшается также и эффективное значение анодного тока.

Эффективные значения анодного тока будут для схемы без отсасывающей катушки

$$I_{ан} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{6m}} g = \frac{I_{cp}}{\sqrt{1}} g = 0,408 I_{cp} g, \quad (109)$$

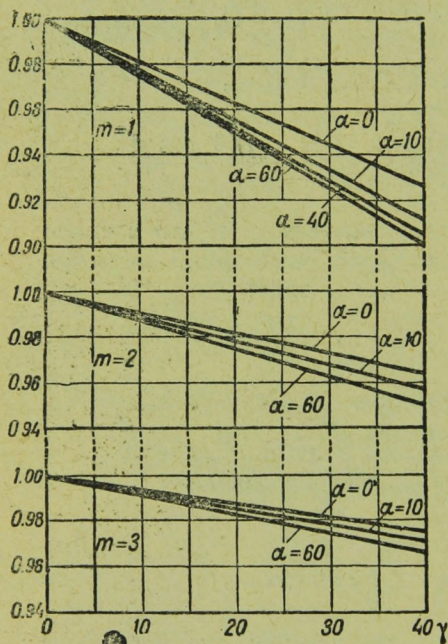
для схемы с двухфазной катушкой

$$I_{ан} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{6 \cdot 2}} g = \frac{I_{cp}}{2\sqrt{3}} g = 0,289 I_{cp} g \quad (110)$$

и для схемы с трехфазной катушкой

$$I_{ан} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{6 \cdot 3}} g = \frac{I_{cp}}{3\sqrt{2}} g = 0,236 I_{cp} g. \quad (111)$$

Высшие гармоники, получающиеся в результате конечных значений реактансов во внешней цепи отсасывающей катушки и трансформатора, будут увеличивать эффективные значения анодных токов. Их влияние мы можем учесть, если вместо среднего значения выпрямленного тока возьмем для схемы без отсасывающей катушки эффективное значение тока во внешней цепи. Для схемы с



Фиг. 30. Степень уменьшения анодного тока $I_{ан}$ в результате перекрытия (γ) при различных углах регулирования α .

двухфазной катушкой вместо I_{cp} — двойное эффективное значение тока в отсасывающей катушке, т. е. $2I_{кат}$, а для схемы с трехфазной катушкой вместо I_{cp} возьмем $3I_{кат}$.

Таким образом эффективные значения анодных токов могут быть выражены через [см. формулы (83) и (88)]

$$I_{an} = \frac{I_{кат} \cdot m}{\sqrt{6m}} \sqrt{1 - \frac{6}{m} \phi(\alpha, \gamma)} = I_{кат} \sqrt{\frac{m}{6}} g, \quad (112)$$

или

$$I_{an} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{6m}} g \left(1 + \frac{\epsilon_{ам}}{2} \right). \quad (112a)$$

На такую силу тока должно быть рассчитано сечение каждой фазы вторичной обмотки. Для работы ртутника кроме эффективного значения тока, проходящего через каждый анод, весьма существенную роль играет еще максимальное мгновенное значение анодного тока.

Ввиду того что путем расчета определить это максимальное значение весьма сложно, мы ограничимся указанием тех пределов, в которых возможно отклонение анодного тока от соответствующей доли среднего значения выпрямленного тока.

Для схемы без отсасывающей катушки эти пределы будут

$$i_{an \max} = I_{cp} \pm \sqrt{2} [I_6 + I_{12} + I_{18} + \dots], \quad (113)$$

для схемы с двухфазной катушкой

$$i_{an \max} = \frac{I_{cp}}{2} \pm \sqrt{2} \left[I_3 + \frac{I_6}{2} + I_9 + \frac{I_{12}}{2} + I_{15} + \dots \right] \quad (114)$$

и для схемы с трехфазной катушкой

$$i_{an \max} = \frac{I_{cp}}{3} \pm \sqrt{2} \left[I_2 + I_4 + \frac{I_6}{3} + I_8 + I_{10} + \frac{I_{12}}{3} + \dots \right]. \quad (115)$$

17. ТОКИ В ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Токи в каждой из вторичных обмоток протекают лишь в одном направлении. Но все же, если мы будем рассматривать каждые две противоположные фазы вторичной обмотки как одно целое, мы можем считать, что действие вторичной

обмотки на первичную было бы такое же, если бы мы число фаз вторичной обмотки сократили вдвое (с 6 на 3) и через каждую такую фазу пропустили переменный ток с формой кривой, которая состояла бы за первую половину периода из кривой тока, когда ток протекает через одну вторичную фазу, и за вторую половину периода из такой же кривой, сдвинутой по отношению к первой на полпериода или на 180° , но взятой с обратным знаком (фиг. 29).

Если предположить, что первичная обмотка соединена в треугольник, и если не принимать во внимание намагничивающей слагающей тока, то при одинаковом числе витков первичные и вторичные токи будут иметь одну и ту же форму кривой.

Так как ток в первичной обмотке протекает как в первую, так и во вторую половину периода, то эффективное значение первичного тока (без учета намагничивающей слагающей и влияния гармоник вторичной стороны) будет в $\sqrt{2}$ раз больше [см. формулу (105)]

$$I_{перв} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot 2 \int_0^\pi i_{ан}^2 du} = I_{ан} \sqrt{2}, \quad (116)$$

или, если воспользоваться формулой (105), мы для рассматриваемых трех схем получаем, когда $m=1$,

$$I_{перв} = I_{ан} \sqrt{2} = \frac{I_{ср} \sqrt{2}}{\sqrt{6m}} g = \frac{I_{ср}}{\sqrt{3}} g = 0,577 I_{ср} g,$$

когда $m=2$,

$$I_{перв} = \frac{I_{ср} \sqrt{2}}{\sqrt{6 \cdot 2}} g = \frac{I_{ср}}{\sqrt{6}} g = 0,408 I_{ср} g,$$

и когда $m=3$,

$$I_{перв} = \frac{I_{ср} \sqrt{2}}{\sqrt{6 \cdot 3}} = \frac{I_{ср}}{3} g = 0,333 I_{ср} g.$$

Значения коэффициента g для данных трех схем в зависимости от угла перекрытия и регулирования приведены на фиг. 30.

18. РАЗЛОЖЕНИЕ ТОКА В ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКЕ ТРАНС- ФОРМАТОРА НА ВЫШНИЕ ГАРМОНИКИ

При разложении первичного тока в ряд примем за начало счета времени или углов момент прохождения напряжения соответствующей фазы через нуль.

При отсутствии регулирования и перекрытия кривая тока имела бы прямоугольную форму с горизонтальной частью на протяжении

$$m = \frac{2\pi}{6} = m \cdot 60^\circ$$

(где m в зависимости от схемы будет равно или 1, или 2, или 3) и при этом прямоугольная волна была бы симметрично расположена относительно синусоиды напряжения.

При регулировании на угол α начало кривой тока сдвинется на угол α , т. е. оно будет отстоять от начала счета (точки O фиг. 29) на угол

$$\frac{\pi}{2} - \frac{m\pi}{6} + \alpha \equiv \alpha + 90 - m \cdot 30^\circ.$$

Если имеет место перекрытие анодов, то ток от момента начала до полного перехода на данный анод будет меняться в пределах от $u = \alpha + 90^\circ - m \cdot 30^\circ$ до $u = \alpha + \gamma + 90^\circ - m \cdot 30^\circ$:

$$i_{перв} = \frac{I_{cp}}{m} \frac{\cos \alpha - \cos (u - 90^\circ + m \cdot 30^\circ)}{\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)} = i'_{перв}. \quad (117)$$

После перехода тока на данный анод в пределах углов от $u = \alpha + \gamma + 90^\circ - m \cdot 30^\circ$ до $u = \alpha + 90^\circ + m \cdot 30^\circ$ ток будет иметь постоянную величину

$$i_{перв} = \frac{I_{cp}}{m}.$$

И наконец, за время перехода дуги с данного анода на следующий, т. е. в промежуток от $u = \alpha + 90 + m \cdot 30^\circ$ до $u = \alpha + \gamma + 90^\circ + m \cdot 30^\circ$

ток будет меняться по уравнению

$$i_{перв} = \frac{I_{cp}}{m} \left[1 - \frac{\cos \alpha - \cos (u - 90^\circ - m \cdot 30^\circ)}{\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)} \right] = i'_{перв}. \quad (118)$$

Так как кривая симметрична за обе половины периода, то при определении амплитуд гармоник мы можем ограничиться интегрированием за полпериода

$$\begin{aligned} A'_k &= A_k \sin \phi_k = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i_{перв} \cos ku \, du = \\ &= \frac{2}{\pi} \left\{ \int_{\alpha+90^\circ-m \cdot 30^\circ}^{\alpha+\gamma+90^\circ-m \cdot 30^\circ} i'_{перв} \cos ku \, du + \int_{\alpha+\gamma+90^\circ-m \cdot 30^\circ}^{\alpha+90^\circ+m \cdot 30^\circ} \frac{I_{cp}}{m} \cos ku \, du + \right. \\ &\quad \left. + \int_{\alpha+90^\circ+m \cdot 30^\circ}^{\alpha+\gamma+90^\circ+m \cdot 30^\circ} i''_{перв} \cos ku \, du \right\} = \frac{4I_{cp} \sin (km \cdot 30^\circ)}{m\pi k} \times \\ &\times \left\{ \frac{k [\sin k (90^\circ + \alpha + \gamma) \cdot \sin (\alpha + \gamma) - \sin k (90^\circ + \alpha) \cdot \sin \alpha]}{(k^2 - 1) [\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)]} - \right. \\ &\quad - \frac{[\cos k (90^\circ + \alpha) \cdot \cos \alpha - \cos k (90^\circ + \\ &\quad \left. + \alpha + \gamma) \cdot \cos (\alpha + \gamma)]}{(k^2 - 1) [\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)]} \dots \right. \\ &\quad \left. \dots \frac{+ \alpha + \gamma) \cdot \cos (\alpha + \gamma)}{(k^2 - 1) [\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)]} \right\}. \quad (119) \end{aligned}$$

Аналогичным образом находим и другую слагающую:

$$A''_k = A_k \cos \phi_k = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i_{перв} \sin ku \, du = \frac{4I_{cp} \sin (km \cdot 30^\circ)}{m\pi k} \times$$

$$\times \left\{ \frac{k [\cos k(90 + \alpha) \cdot \sin \alpha - \cos k(90 + \alpha + \gamma) \cdot \sin(\alpha + \gamma)]}{(k^2 - 1) [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]} + \right. \\ \left. + \frac{[\sin k(90 + \alpha + \gamma) \cdot \cos(\alpha + \gamma) - \sin k(90 + \alpha) \cdot \cos \alpha]}{(k^2 - 1) [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]} \right\}. \quad (120)$$

Для основной синусоиды, т. е. для $k=1$ вторые множители принимают неопределенный вид $\frac{0}{0}$. Для раскрытия неопределенности берем первую производную от числителя и знаменателя и определяем далее эффективные значения активной слагающей основной синусоиды (так как ток отстает от напряжения, то $\psi_1 = -\varphi_1$):

$$I_{1 \text{ перв. акт}} = I_{1 \text{ перв}} \cos \varphi_1 = \frac{A_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{2}} = \\ = \frac{I_{cp} \sin(m \cdot 30^\circ) \cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)}{m\pi \sqrt{2} \cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} = \\ = I_{cp} \frac{4 \sin(m \cdot 30^\circ) \cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{m\pi \sqrt{2} \cdot 2}. \quad (121)$$

На основании уравнений

$$U_{cp0} = U_2 \frac{3}{\pi} \frac{4 \sin(m \cdot 30^\circ)}{m \sqrt{2}} \quad (122)$$

и

$$U_{cp} = U_{cp0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} = \\ = 3U_2 \frac{4 \sin(m \cdot 30^\circ) \cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{m\pi \sqrt{2} \cdot 2} \quad (123)$$

[правильность уравнения (122) может быть проверена, если вместо m подставить 1, 2 и 3, тогда мы получаем уравнения (4), (11) и (20)]; значение активной слагающей основной гармоники приводится к виду

$$I_{1 \text{ перв. акт}} = \frac{I_{cp} U_{cp}}{3U_2} = \frac{P}{3U_2},$$

что мы могли бы написать непосредственно, так как мы пренебрегли всеми потерями, и высшие гармоники с внешним напряжением, изменяющимся по синусоиде основной частоты, не дают активной мощности, а потому активная слагающая тока должна равняться мощности, поступающей в нашу трехфазную установку, деленной на тройное фазовое напряжение.

Для реактивной слагающей основной синусоиды тока ($k=1$) мы аналогичным образом после двукратного дифференцирования числителя и знаменателя второго множителя в уравнении (119) получаем

$$I_{1 \text{ перв. реакт}} = I_{1 \text{ перв}} \sin \varphi_1 = -\frac{A_1 \sin \varphi_1}{\sqrt{2}} = \\ = I_{cp} \cdot \frac{4 \sin (m \cdot 30^\circ)}{\pi \sqrt{2}} \cdot \frac{2\gamma + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \gamma)}{4 [\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)]}. \quad (124)$$

После замены на основании уравнения (122) мы после некоторых преобразований для реактивной слагающей будем иметь

$$I_{1 \text{ перв. реакт}} = \frac{P}{3U_2} \cdot \frac{2\gamma + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \gamma)}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)}. \quad (125)$$

Зная активную и реактивную слагающие основной синусоиды, мы можем определить эффективное значение основной синусоиды

$$I_{1 \text{ перв}} = \sqrt{I_{1 \text{ перв. акт}}^2 + I_{1 \text{ перв. реакт}}^2} = \\ = \frac{P}{3U_2} \frac{\sqrt{2(1 - \cos 2\gamma) - 4\gamma [\sin 2(\alpha + \gamma) - \sin 2\alpha] + 4\gamma^2}}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)} = \\ = \frac{P}{3U_2} \xi_1(\alpha, \gamma). \quad (126)$$

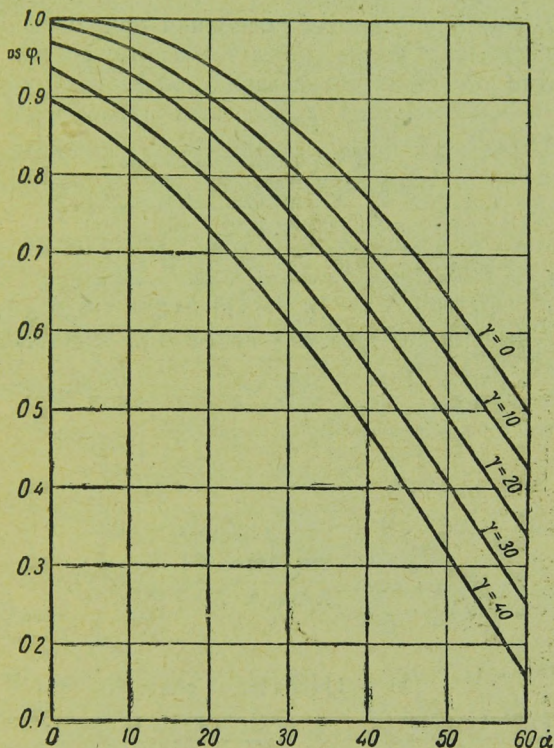
Так как мощность трехфазного тока (при отсутствии потерь) равна

$$P = 3U_2 I_{1 \text{ перв}} \cos \varphi_1, \quad (127)$$

то косинус угла сдвига между синусоидальным напряжением и первой гармоникой тока в первичной обмотке трансформа-

тора будет

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\xi_1(\alpha, \gamma)} = \frac{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)}{\sqrt{2(1 - \cos 2\gamma) - 4\gamma[\sin 2(\alpha + \gamma) - \sin 2\alpha] + 4\gamma^2}}. \quad (128)$$



Фиг. 31. Зависимость косинуса угла сдвига $\cos \varphi_1$ основной синусоиды тока от угла регулирования α при различных углах перекрытия γ .

Значения $\cos \varphi_1$ в зависимости от угла регулирования α при различных углах перекрытия и представлены в виде кривых на фиг. 31.

При $\gamma = 0$ последнее выражение для $\cos \varphi_1 = \frac{0}{0}$ представляет собой неопределенность. После подведения числителя под корень и двукратного дифференцирования числителя и знаменателя по γ мы получаем, что когда $\gamma = 0$, то

$$\cos \varphi_1 = \cos \alpha. \quad (129)$$

Как мы видим, перекрытие, особенно при больших углах регулирования, еще более снижает значение $\cos \varphi_1$.

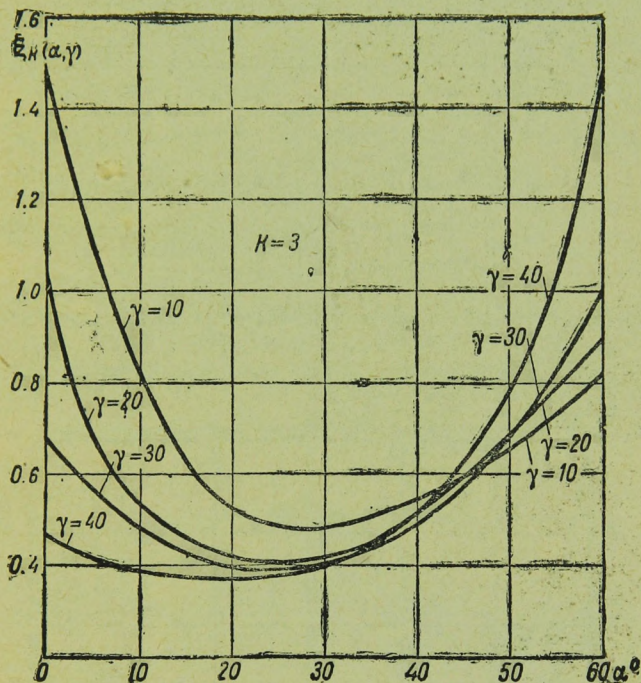
Переходим теперь к определению эффективных значений гармоник первичного тока в обмотках трансформатора [см. уравнения (119) и (120)].

$$\begin{aligned} I_{k \text{ перв}} &= \frac{\sqrt{A_k^2 \sin^2 \phi_k + A_k^2 \cos^2 \phi_k}}{\sqrt{2}} = \\ &= I_{cp} \cdot \frac{4 \sin(km \cdot 30^\circ)}{m\pi k \sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{D}}{(k^2 - 1) [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]} = \\ &= I_{cp} \cdot \frac{4 \sin(m \cdot 30^\circ)}{m\pi \sqrt{2}} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} \cdot \frac{\sin(km \cdot 30^\circ)}{k \sin(m \cdot 30^\circ)} \times \\ &\quad \times \frac{\sqrt{D}}{(k^2 - 1) [\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)]} = \\ &= \frac{P}{3U_2} \cdot \frac{\sin(km \cdot 30^\circ)}{k \sin(m \cdot 30^\circ)} \cdot \frac{\sqrt{D}}{(k^2 - 1) [\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)]} = \\ &= I_{1 \text{ перв. акт}} \frac{\sin(km \cdot 30^\circ)}{k \sin(m \cdot 30^\circ)} \xi_k(\alpha, \gamma), \quad (130) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \xi_k(\alpha, \gamma) &= \frac{\sqrt{D}}{(k^2 - 1) [\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)]} = \\ &= \left\{ \frac{\{k^2 [\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha + \gamma) - 2 \sin \alpha \cdot \sin(\alpha + \gamma) \cdot \cos k\gamma]\}}{(k^2 - 1) [\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)]} + \right. \\ &\quad + \frac{\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha + \gamma) - 2 \cos \alpha \cdot \cos(\alpha + \gamma) \cdot \cos k\gamma}{(k^2 - 1) [\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)]} + \\ &\quad \left. - \frac{2k \sin \gamma \cdot \sin k\gamma}{(k^2 - 1) [\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (131) \end{aligned}$$

Вместо k в последние формулы для получения эффективного значения высших гармоник токов в первичной обмотке трансформатора необходимо подставить $k = 3, 5, 7, 9, 11, \dots$ Каждая из высших гармоник тока в первичной обмотке трансформатора



Фиг. 32а. Коэффициент $\xi(\alpha, \gamma)$, определяющий изменение эффективных значений третьих гармоник первичного тока в зависимости от углов α и γ .

тора равна произведению активной слагающей основной синусоиды и двух множителей, из которых первый множитель

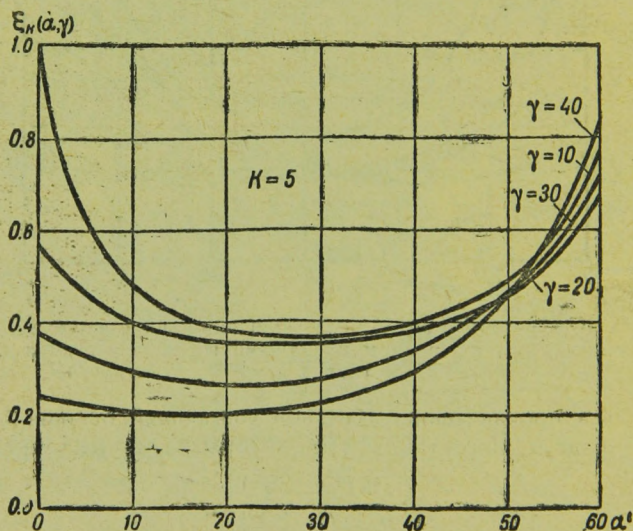
$$\frac{\sin(km \cdot 30^\circ)}{k \sin(m \cdot 30^\circ)}$$

представляет собой отношение амплитуды или эффективного значения высшей гармоники порядка k к тому же значению

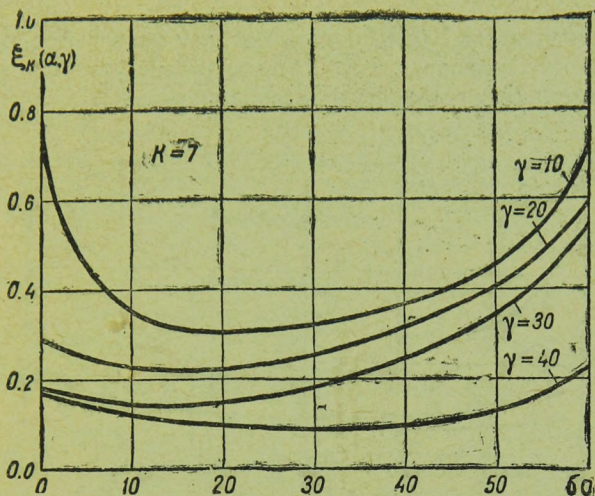
основной синусоиды, когда нет регулирования и перекрытия, т. е. когда $\alpha = 0$ и $\gamma = 0$. Значения первого множителя представлены в следующей таблице:

Таблица значения $\frac{\sin(km \cdot 30^\circ)}{k \sin(m \cdot 30^\circ)}$

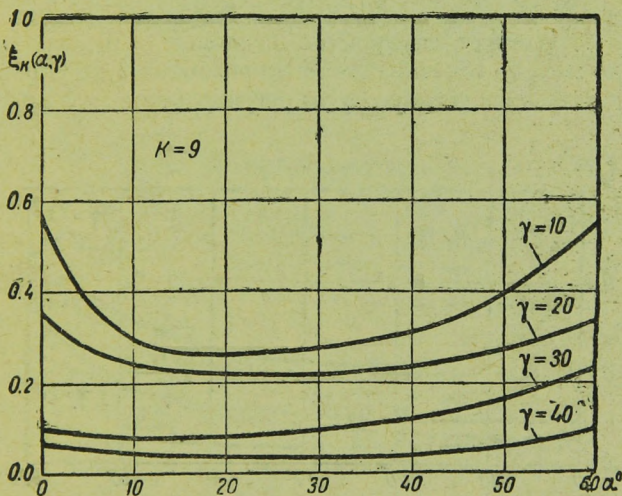
k	1	3	5	7	9	11	13	15
$m=1$	1	$-2/3$	$+1/5$	$+1/7$	$-2/9$	$+1/11$	$+1/13$	$-2/15$
$m=2$	1	0	$1/5$	$+1/7$	0	$-1/11$	$+1/13$	0
$m=3$	1	$+1/3$	$+1/5$	$+1/7$	$+1/9$	$+1/11$	$+1/13$	$+1/15$



Фиг. 32б. Коэффициент $E(\alpha, \gamma)$, определяющий изменение эффективных значений пятых гармоник от углов α и γ .

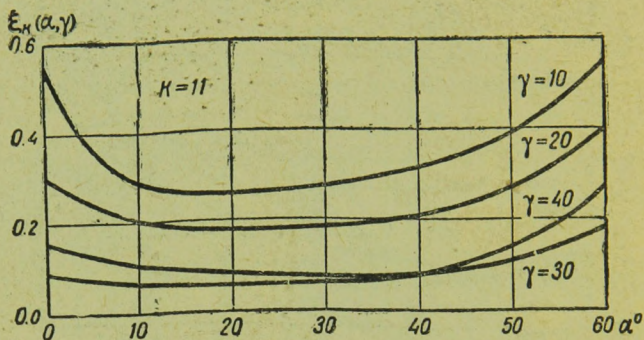


Фиг. 32с. Коэффициент $\xi(\alpha, \gamma)$, определяющий изменение эффективных значений седьмых гармоник первичного тока в зависимости от углов α и γ .



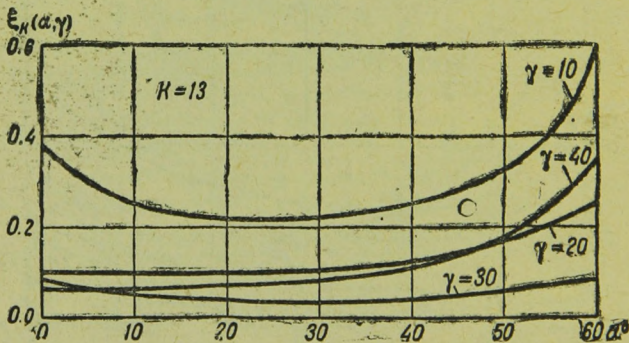
Фиг. 32д. Коэффициент $\xi(\alpha, \gamma)$, определяющий изменение эффективных значений девятых гармоник первичного тока в зависимости от углов α и γ .

Второй множитель $\xi_k(\alpha, \gamma)$ показывает, как изменяются высшие гармоники по сравнению с тем случаем, когда $\alpha = 0$ и $\gamma = 0$, в зависимости от углов регулирования и перекрытия.



Фиг. 32е. Коэффициент $\xi(\alpha, \gamma)$, определяющий изменение эффективных значений 11-х гармоник в зависимости от углов α и γ .

Когда отсутствует перекрытие анодов ($\gamma = 0$), но имеется регулирование, то величина второго множителя $\xi_k(\alpha, \gamma)$ равна обратному значению косинуса угла регулирования, что можно до-

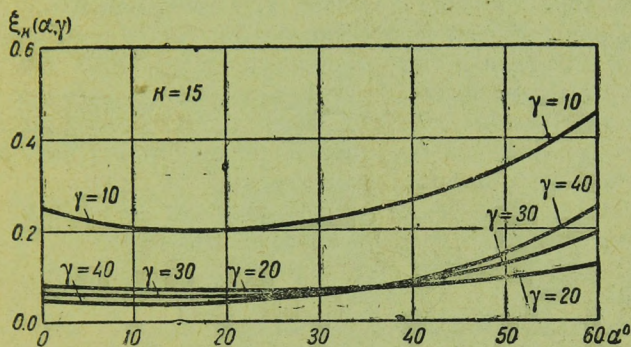


Фиг. 32ф. Коэффициент $\xi(\alpha, \gamma)$, определяющий изменение эффективных значений 13-х гармоник первичного тока в зависимости от углов α и γ .

казать, раскрыв неопределенность коэффициента $\xi_k(\alpha, \gamma)$ при $\gamma = 0$

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \xi_k(\alpha, \gamma) = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (132)$$

Значения множителя $\xi_k(\alpha, \gamma)$ в зависимости от α и γ представлены на фиг. 32а—г. Как мы видим, с увеличением угла перекрытия высшие гармоники возрастают.



Фиг. 32г. Коэффициент $\xi(\alpha, \gamma)$, определяющий изменение эффективных значений 15-х гармоник первичного тока в зависимости от углов α и γ .

19. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Разложение кривых токов в обмотках трансформаторов показывает, что токи эти состояются из весьма больших по своей относительной величине высших гармоник.

Особое внимание заслуживают гармоники, кратные трем. Третьи гармоники во всех трех фазах имели бы совпадающие по величине и направлению мгновенные значения. Но так как в нулевой точке первичной обмотки трансформатора в случае соединения ее в звезду сумма мгновенных значений токов должна равняться нулю, то третьи гармоники токов должны быть естественным образом подавлены соответствующими слагающими напряжения трехкратной периодичности, возникающими в обмотках трансформатора. На линейное напряжение (внешней сети) эти слагающие влиять не будут, так как по отношению

к линейному напряжению эти трехкратные слагающие двух смежных фазовых напряжений взаимно уравниваются, но вследствие возникновения этих дополнительных слагающих напряжения трехкратной периодичности нулевая точка трансформатора будет с трехкратной периодичностью менять свое напряжение по отношению ко всей системе. Результатом этого возникновения третьих гармоник напряжения в фазовых обмотках трансформатора будет появление в выпрямленном токе третьих гармоник, т. е. дополнительное искажение формы кривой постоянного тока. На стороне же переменного тока (линии) вся система проводов не будет иметь своим средним потенциалом нуль, а ее средний потенциал будет совершать гармонические колебания с трехкратной частотой. Оба эти явления при больших мощностях могут быть очень неприятны, особенно, если учесть, что третья гармоника составляет для схемы без отсасывающей катушки ($m = 1$) 66% от основной синусоиды, а при трехфазной отсасывающей катушке ($m = 3$) — 33%. Перекрытие немного сглаживает влияние этих гармоник.

На основании сказанного соединение звездой, если не говорить о малых мощностях, приемлемо лишь в том случае, если схема содержит двухфазную отсасывающую катушку, при которой третьи гармоники отсутствуют.

При соединении первичной обмотки в треугольник третьи гармоники тока будут замыкаться в трех фазах, соединенных последовательно в треугольник, и теоретически не будут падать в первичную сеть.

В тех случаях, когда по специфическим условиям установки, например, в силу необходимости работать в зависимости от режима производства при разных выпрямленных напряжениях, приходится прибегать также к соединению первичной обмотки в звезду, следует рекомендовать применять трансформаторы, имеющие на своих стержнях третьи компенсационные обмотки, соединенные последовательно в треугольник.

Для выяснения распределения токов между первичной и компенсационной обмотками разложим кривую тока, которая протекала бы через первичную обмотку при отсутствии пропорциональной обмотки, когда не было бы перекрытия на высшие гармоники.

Для случая без отсасывающей катушки, если принять, что эффективное значение первичного тока равняется единице, мы имели бы

$$y = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin u - \frac{2}{3} \sin 3u + \frac{1}{5} \sin 5u + \frac{1}{7} \sin 7u - \frac{2}{9} \sin 9u + \dots \right] \quad (133)$$

Если выделить все гармоники, кратные трем, то действующее значение их составит $q_1 = 58\%$ от общего тока, а действующее значение остальных слагающих $p_1 = 82\%$:

$$[\sqrt{58^2 + 82^2} = 100].$$

При двухфазной отсасывающей катушке ток может быть представлен в виде (эффективное значение равно 1)

$$y = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \left[\sin u - \frac{1}{5} \sin 5u + \frac{1}{7} \sin 7u - \frac{1}{11} \sin 11u + \frac{1}{13} \sin 13u + \dots \right] \quad (134)$$

Третьи гармоники отсутствуют, $p_2 = 100\%$

Для трехфазной отсасывающей катушки кривая тока может быть представлена в виде (эффективное значение равно 1)

$$y = \frac{4}{\pi} \left[\sin u + \frac{1}{3} \sin 3u + \frac{1}{5} \sin 5u + \frac{1}{7} \sin 7u + \dots \right] \quad (135)$$

Эффективное значение третьих гармоник составляет $q_3 = 33\%$, а остальных составляющих $p_3 = 94,5\%$:

$$[\sqrt{33^2 + 94,5^2} = 100].$$

Таким образом компенсационная обмотка должна быть рассчитана при отсутствии отсасывающей катушки на 58% номинального тока, а при трехфазной катушке — на 33% от

номинального тока. При наличии компенсационной обмотки первичная обмотка могла бы быть немного уменьшена соответственно остающимся слагающим.

Влияние регулирования и перекрытия на распределение эффективного значения третьих гармоник и остальных слагающих (кривые p и q) в долях от всего первичного тока представлено в виде кривых на фиг. 33. Способ построения кривых p_1 и q_1 и p_3 и q_3 будет освещен в § 23.

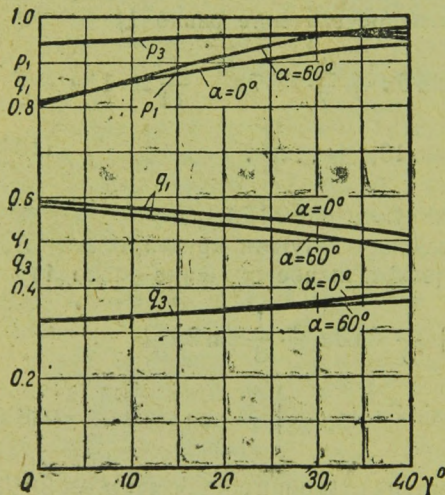
20. ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЦЕПИ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА НА ПЕРВИЧНЫЙ ТОК В ТРАНСФОРМАТОРЕ

В последних трех параграфах мы олагали, что в цепи постоянного тока мы имеем дело с идеально выпрямленным током, не содержащим высших гармоник, или, другими сло-

вами, что индуктивность в цепи постоянного тока имеет бесконечно большую величину, сглаживающую все гармоники в цепи постоянного тока.

Но и при этих условиях в схемах с отсасывающей катушкой через эту катушку и через обмотки трансформатора будут проходить гармоники, обусловленные намагничивающими (выравнивающими) токами этих отсасывающих катушек.

Выясним, в какой мере и какие гармоники получаются в первичной обмотке трансформатора под действием гармоник, проходящих через цепь постоянного тока и через отсасывающую катушку.



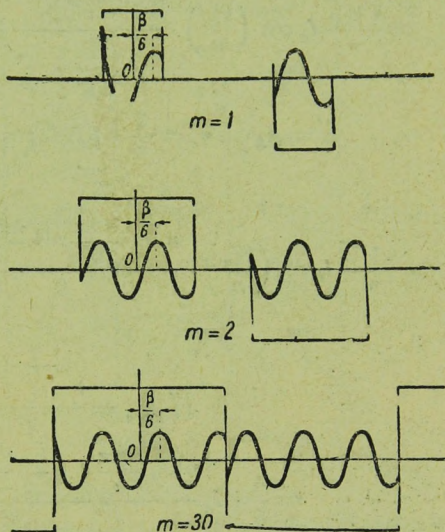
Фиг. 33. Эффективные значения гармоник, кратных трем (q_1 и q_3), и эффективные значения основной синусоиды и остальных гармоник (p_1 и p_3) в долях тока в первичной обмотке трансформатора для схем $m=1$ и $m=3$ катушки в зависимости от углов α и γ .

Чтобы не вводить чересчур сложных выкладок, ограничимся случаем, когда отсутствует перекрытие ($\gamma = 0$) и сделаем предположение, что высшие гармоники во вторичной обмотке трансформатора одновременно с переходом дуги с одного анода на другой переходят без изменений из одной фазы в другую.

Так как во вторичной обмотке трансформатора токи через полпериода проходят в том же направлении через противоположную фазу, то в первичной обмотке мы будем иметь кривые тока, меняющиеся за вторую половину периода, так же как и за первую половину периода, но с обратным знаком. В результате этого четные гармоники цепи постоянного тока (кратные шести) или же четные гармоники выравнивающих токов при трехфазной отсасывающей катушке не будут давать четных гармоник в первичной обмотке трансформатора. В этой обмотке будут получаться лишь гармоники нечетного порядка.

Предположим, что мы имеем во вторичной обмотке гармонику n -го порядка с эффективным значением I_n и со сдвигом фазы β , что соответствует углу $\frac{\beta}{n}$ по отношению к основной синусоиде.

При таком сдвиге фаз в зависимости от схемы соединения ($m = 1, 2, 3$) кривые соответствующих составляющих первичного тока, компенсирующих эту гармонику во вторичной обмотке, будут иметь форму, указанную на фиг. 34.



Фиг. 34. Высшие гармоники первичного тока, обусловленные гармониками вторичного тока.

Разложение этих кривых на основную и высшие гармоники приводит к следующим формулам:

$$A'_k = A_k \sin \varphi_k = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_n - \frac{m\pi}{6}}^{\beta_n + \frac{m\pi}{6}} I_n \sqrt{2} \cos(nu - \beta_n) \cos ku \, du =$$

$$= \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_n \cos\left(\frac{k\beta_n}{n}\right) \cdot \frac{n \sin \frac{nm\pi}{6} \cos \frac{km\pi}{6} - k \cos \frac{nm\pi}{6} \sin \frac{km\pi}{6}}{n^2 - k^2}, \quad (136)$$

$$A''_k = A_k \cos \varphi_k = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_n - \frac{m\pi}{6}}^{\beta_n + \frac{m\pi}{6}} I_n \sqrt{2} \cos(nu - \beta_n) \sin ku \, du =$$

$$= \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_n \sin\left(\frac{k\beta_n}{n}\right) \cdot \frac{n \sin \frac{nm\pi}{6} \cos \frac{km\pi}{6} - k \cos \frac{nm\pi}{6} \sin \frac{km\pi}{6}}{n^2 - k^2}, \quad (137)$$

или

$$I''_{k \text{ пер}} = \frac{\sqrt{A'^2_k + A''^2_k}}{\sqrt{2}} =$$

$$= \frac{4}{\pi} \cdot I_n \frac{n \sin \frac{nm\pi}{6} \cos \frac{km\pi}{6} - k \cos \frac{nm\pi}{6} \sin \frac{km\pi}{6}}{n^2 - k^2}. \quad (138)$$

Как вытекает из выводов § 10, в выпрямленном токе наиболее резко выступают гармоники шестого порядка, они же, как видно из таблицы на стр. 103 $n=6$, в наибольшей степени передаются в первичную обмотку, вызывая там свою группу высших гармоник с особенно резким выделением пятых и седьмых гармоник, причем эти пятые гармоники будут складываться с пятыми гармониками, получающимися от разложения кривой первичного тока в случае, если бы в выпрямленном токе не было высших гармоник. Перекрытие анодов будет уменьшать проникновение в первичную обмотку высших гармоник в результате волнистости выпрямленного тока.

Таблица отношений гармоник первичного тока к гармоникам выпрямленного тока

$n =$	$m = 1$		$m = 2$		$m = 3$	
	6	12	6	12	6	12
$k = 1$	0,018	0,004	0,036	0,007	0,036	0,009
$k = 3$	0,071	0,014	0	0	0,127	0,028
$k = 5$	0,288	0,017	0,501	0,046	0,573	0,052
$k = 7$	0,338	0,047	0,538	0,079	0,539	0,093
$k = 9$	0,127	0,091	0	0	0,254	0,181
$k = 11$	0,082	0,304	0,144	0,502	0,164	0,610

При расчетах можно не принимать во внимание влияния перекрытия на уменьшение этих гармоник и ограничиваться лишь определением пятых гармоник.

Высшие гармоники во вторичной обмотке, протекающие от выравнивающих (намагничивающих) токов отсасывающих катушек (для которых $n = 3, 9, \dots$ при $m = 2$ и $n = 2, 4, 8, \dots$ при $m = 3$), могут быть легко снижены соответствующим подбором числа витков и величиной магнитного потока отсасывающих катушек и обыкновенно составляют около 0,5—1% от величины выпрямленного тока. Поэтому их можно не принимать во внимание. Иначе обстоит дело с гармониками во внешней цепи выпрямленного тока, кратными шести, которые могут быть снижены лишь при помощи весьма дорогих и громоздких реактивных катушек (в этих катушках имеется постоянное некомпенсированное намагничивание от постоянного тока). Эти гармоники могут сказываться весьма заметно на форме кривой

тока в первичной обмотке трансформатора. Если вместо n в последние формулы подставить 6, 12 и т. д., то мы получаем, что

$$I''_{6\text{ перв}} = I_n \frac{4}{\pi} \frac{k \sin(km \cdot 30^\circ)}{36 - k^2};$$

$$I''_{12\text{ перв}} = I_n \frac{4}{\pi} \frac{k \sin(km \cdot 30^\circ)}{144 - k^2} \text{ и т. д.} \quad (139)$$

В таблице на стр. 103 даны эффективные значения слагающих гармоник тока в первичной обмотке трансформатора в долях соответствующих эффективных значений гармоник выпрямленного тока.

21. ПОЛНЫЙ ТОК В ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Выше мы определили отдельные составляющие первичного тока в трансформаторе без учета намагничивающего тока (тока холостого хода).

Если учесть и эту слагающую (I_0 — первичный ток холостого хода, φ_0 — угол сдвига при холостом ходе), то в предположении, что намагничивающий ток имеет синусоидальную форму, мы для основной синусоиды первичного тока получили бы

$$I_{\text{перв}} = \sqrt{I_{1\text{ перв}}^2 + I_0^2 + 2I_0 I_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1)}, \quad (140)$$

где φ_1 — угол сдвига основной синусоиды нагрузочного тока по отношению к напряжению. Весь первичный ток в этом случае равнялся бы

$$I_{\text{перв}} = \sqrt{I_{1\text{ перв}}^2 + I_0^2 + 2I_0 I_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1) + \sum I_{k\text{ перв}}'^2 + \sum I_{k\text{ перв}}''^2}. \quad (141)$$

22. РАСЧЕТНАЯ МОЩНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРА

Основными характеристиками всякого трансформатора являются: отдаваемая мощность, падение напряжения короткого замыкания, к. п. д. и ток холостого хода,

В отношении к. п. д., определяющего потери в трансформаторе, и тока холостого хода, от которого зависит большее или меньшее ухудшение коэффициента мощности на первичной стороне трансформатора по сравнению со вторичной, мы останавливаться здесь не будем, поскольку выбор их определяется общими соображениями независимо от того, для какой цели предназначается трансформатор.

Иначе дело обстоит с двумя другими величинами. Напряжение короткого замыкания, по величине совпадающее почти вполне со своей реактивной слагающей, имеет весьма существенное значение для работы ртутника. Большой реактанс короткого замыкания дает большие углы перекрытия. Чем больше угол перекрытия, тем меньше эффективное значение анодного тока при том же значении выпрямленного тока, тем меньше нагреваются аноды и тем больший выпрямленный ток можно получить от данного типа ртутника. Однако при больших реактансах благодаря большему углу перекрытия характеристика ртутного выпрямителя, дающего большие падения напряжения, будет спадать круче.

Так как при регулировании угол перекрытия резко снижается (фиг. 12), то для того, чтобы данный ртутник мог и при регулировании давать тот же ток, что и без регулирования ($\alpha = 0$), желательно для регулируемого ртутника иметь трансформатор с большим рассеянием.

С другой стороны, большой реактанс трансформаторов ухудшает коэффициент мощности всей установки. На практике реактансы трансформаторов, питающих ртутники, выбираются порядка 6—10%.

При установлении расчетной мощности трансформатора необходимо определить кажущуюся мощность одной фазы, — порознь для первичной и вторичной обмоток. Кажущаяся мощность может быть выражена как произведение эффективных значений напряжения и тока, соответствующих, с одной стороны, максимальному требующемуся выпрямленному напряжению при номинальном токе с учетом падения напряжения вследствие перекрытия анодов и с другой — максимальному значению выпрямленного тока независимо от регулирования напряжения с учетом высших гармоник тока, которые могут быть весьма значительны при глубоком регулировании напряжения.

Если U_{cp} — максимальное требуемое напряжение при отсутствии регулирования, $\alpha = 0$ (увеличенное на падение напряжения в дуге), то выпрямленное напряжение при отсутствии регулирования должно быть равно [см. формулу (46)]

$$U_{cp0} = U_{cp} \frac{2}{\cos 0^\circ + \cos(0^\circ + \gamma_0)} = \frac{U_{cp}}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}}, \quad (142)$$

где γ_0 — угол перекрытия при отсутствии регулирования.

Соответствующее фазовое напряжение трансформатора будет

$$U_{2(\alpha=0)} = U_{cp} \frac{\pi \sqrt{2}}{3 \cdot 4 \sin(m \cdot 30^\circ)} \cdot \frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\gamma_0}{2} \right)} \quad (143)$$

[см. формулы (122), (4), (11) и (20)].

Ток во вторичной обмотке трансформатора (он же анодный ток) будет [см. формулу (112)]

$$I_{втор} = I_{ан} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{6m}} \cdot g \left(1 + \frac{\epsilon_{кат}}{2} \right). \quad (144)$$

Кажущаяся мощность вторичной обмотки может быть выражена через (число вторичных обмоток равно шести)

$$\begin{aligned} P_2 &= 6 \cdot U_2 I_{втор} = \\ &= P_{cp} \cdot \frac{\pi}{2 \sqrt{3m} \sin(m \cdot 30^\circ)} g \left(1 + \frac{\epsilon_{кат}}{2} \right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}}, \end{aligned} \quad (145)$$

где P_{cp} — мощность выпрямленного тока.

В первичной обмотке ток без учета тока намагничивания будет равен

$$I_{пер} = I_{втор} \sqrt{2} = \frac{I_{cp}}{\sqrt{3m}} g \left(1 + \frac{\epsilon_{кат}}{2} \right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}}, \quad (146)$$

а соответствующая кажущаяся мощность первичной обмотки будет (число фаз равно трем)

$$P_1 = 3U_2 I_{перв} = \frac{P_2}{\sqrt{2}} =$$

$$= \frac{P_{ср} \cdot \pi}{2 \sqrt{6} \sin(m \cdot 30^\circ)} \cdot g \cdot \left(1 + \frac{\epsilon_{кат}}{2}\right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}} \quad (147)$$

Типовая мощность трансформатора может быть определена как среднее арифметическое мощностей первичной и вторичной обмоток:

$$P_{м\text{ трансф}} = \frac{P_1 + P_2}{2} =$$

$$= P_{ср} \frac{(1 + \sqrt{2}) \pi}{4 \sqrt{6m} \sin(m \cdot 30^\circ)} \cdot g \cdot \left(1 + \frac{\epsilon_{кат}}{2}\right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}} \quad (148)$$

В приведенной ниже таблице (см. стр. 108) даны значения напряжения, токов и мощностей в долях соответствующих значений в цепи выпрямленного тока.

Ввиду того что коэффициент $\epsilon_{кат}$ имеет весьма небольшое значение, можно им при определении расчетной мощности трансформатора пренебречь.

Если первичная обмотка соединена в звезду и трансформатор будет иметь третью компенсирующую обмотку, то вместо приведенной выше расчетной мощности первичной обмотки мы имели бы

$$P_1 = P_{ср} \frac{\pi}{2 \sqrt{6m} \sin(m \cdot 30^\circ)} \cdot g \cdot \left(1 + \frac{\epsilon_{кат}}{2}\right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}} \cdot p, \quad (149)$$

а для компенсационной обмотки

$$P_{комп} = P_{ср} \frac{\pi}{2 \sqrt{6m} \sin(m \cdot 30^\circ)} \cdot g \cdot \left(1 + \frac{\epsilon_{кат}}{2}\right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}} \cdot q, \quad (150)$$

где коэффициенты g , p и q могут быть взяты по кривым

Таблица данных для кажущейся мощности трансформатора

Наименование	$m=1$	$m=2$	$m=3$	Множитель
$\frac{U_2}{U_{cp}} = \frac{m\pi\sqrt{2}}{3.4 \sin(n \cdot 30^\circ)}$	$\frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0,740$	$\frac{\pi\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} = 0,855$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,111$	$\times \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}}$
$\frac{I_{вт\text{тор}}}{I_{cp}} = \frac{1}{\sqrt{6m}}$	$\frac{1}{\sqrt{6}} = 0,408$	$\frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,289$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0,236$	$\times g \left(1 + \frac{\varepsilon_{к\alpha} m}{2}\right)$
$\frac{I_{перв}}{I_{cp}} = \frac{1}{\sqrt{3m}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$	$\frac{1}{\sqrt{6}} = 0,408$	$\frac{1}{3} = 0,333$	$\times g \left(1 + \frac{\varepsilon_{к\alpha} m}{2}\right)$
$\frac{P_2}{P_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3m} \sin(m \cdot 30^\circ)}$	$\frac{\pi}{\sqrt{3}} = 1,81$	$\frac{\pi\sqrt{2}}{3} = 1,48$	$\frac{\pi}{2} = 1,57$	$\times g \left(1 + \frac{\varepsilon_{к\alpha}}{2}\right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}}$
$\frac{P_1}{P_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{6m} \sin(m \cdot 30^\circ)}$	$\frac{\pi}{\sqrt{6}} = 1,28$	$\frac{\pi}{3} = 1,05$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,111$	$\times g \left(1 + \frac{\varepsilon_{к\alpha} m}{2}\right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}}$
$\frac{P_{трансф}}{P_{cp}} = \frac{P_1 + P_2}{2P_{cp}}$	$\frac{\pi(1+\sqrt{2})}{2\sqrt{6}} = 1,56$	$\frac{\pi(1+\sqrt{2})}{6} = 1,27$	$\frac{\pi(1+\sqrt{2})}{4\sqrt{2}} = 1,34$	$\times g \left(1 + \frac{\varepsilon_{к\alpha} m}{2}\right) \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma_0}{2}}$

фиг. 30 и 33, множитель $\frac{\pi}{2\sqrt{6m \sin(m \cdot 30^\circ)}}$ — из таблицы на стр. 108, а коэффициентом $\epsilon_{кат}$ можно пренебречь.

Подразделение первичной обмотки на две обмотки: на обмотку, соединенную с сетью, и на компенсационную обмотку — может заставить перейти к более мощному типу трансформаторов.

Из приведенной таблицы на стр. 108 следует, что при схеме с двухфазной отсасывающей катушкой получается наименьшая расчетная мощность трансформатора. Если к этому еще прибавить, что при двухфазной отсасывающей катушке отсутствуют третьи гармоники и что поэтому первичная обмотка может быть соединена и в треугольник и в звезду без необходимости прибегать к третьей компенсационной обмотке, осложняющей конструкцию трансформатора, то становится очевидным, что из всех схем следует отдавать предпочтение схеме с двухфазной отсасывающей катушкой, которая одновременно дает и наивысший коэффициент мощности установки в силу отсутствия третьих гармоник.

23. ТОКИ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ И КОЭФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ВСЕЙ УСТАНОВКИ

Если бы первичная обмотка была соединена в звезду, то ток в линии и ток в первичной обмотке совпадали бы и коэффициент мощности установки имел бы то же значение, что и коэффициент мощности первичной обмотки, и равнялся бы

$$F = \frac{I_{акт. перв}}{I_{перв}}. \quad (151)$$

Если предположить, что индуктивность в цепи постоянного тока и индуктивность отсасывающей катушки бесконечно велики, и если не учитывать тока холостого хода трансформатора, то кажущаяся мощность установки равнялась бы

$$\begin{aligned} P_{каж} &= 3U_2 I_{перв} = 3U_2 I_{ак} \sqrt{2} = \\ &= 3U_2 \frac{I_{ср}}{\sqrt{3m}} \cdot \sqrt{1 - \frac{6}{m} \phi(\alpha, \gamma)} \end{aligned} \quad (152)$$

[см. формулы (116) и (105)], а соответствующий коэффициент мощности первичной обмотки был бы

$$F = \frac{P_{cp}}{P_{каж}} = \frac{U_{cp} I_{cp}}{3 U_2 I_{пер}} = \frac{\sqrt{3m} U_{cp}}{3 U_2 \sqrt{1 - \frac{6}{m} \phi(\alpha, \gamma)}}. \quad (153)$$

Если вместо U_{cp} подставить его значение [по формуле (123)], то для коэффициента мощности первичной обмотки получается следующее выражение:

$$F = \frac{4 \sin(m \cdot 30^\circ) \cdot \cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{m \pi \sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{3m}}{2 \sqrt{1 - \frac{6}{m} \phi(\alpha, \gamma)}}.$$

Подставляя последовательно $m=1, 2$ и 3 , мы для схемы без отсасывающей катушки имели бы

$$F_{m=1} = \frac{\sqrt{6} \cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{\pi \cdot 2 \sqrt{1 - 6 \phi(\alpha, \gamma)}}. \quad (154)$$

Для схемы с двухфазной отсасывающей катушкой

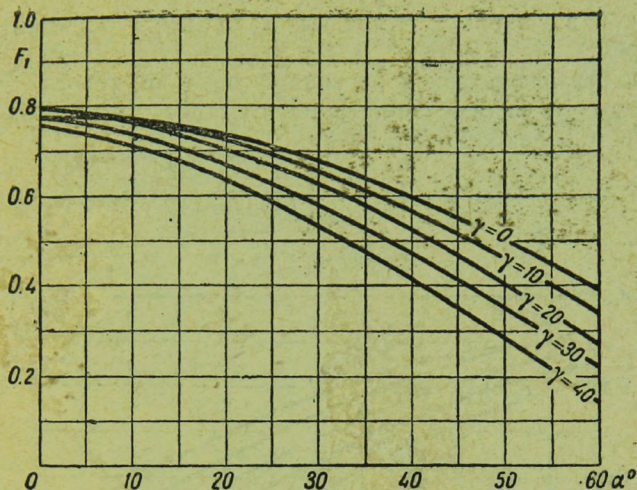
$$F_{m=2} = \frac{3 \cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{\pi \cdot 2 \sqrt{1 - 3 \phi(\alpha, \gamma)}} \quad (155)$$

и для схемы с трехфазной отсасывающей катушкой

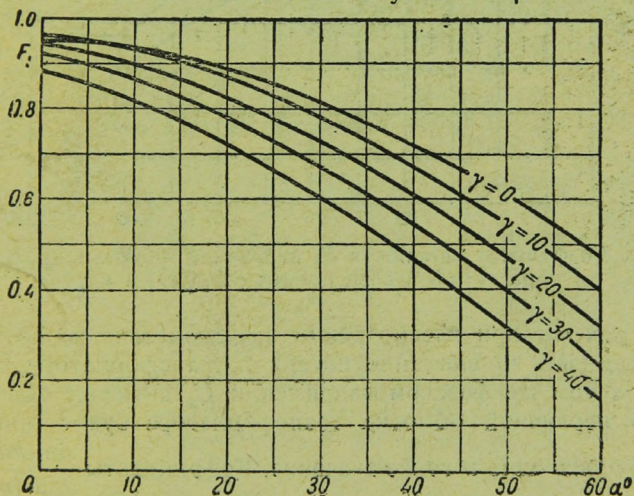
$$F_{m=3} = \frac{2 \sqrt{2} \cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{\pi \cdot 2 \sqrt{1 - 2 \phi(\alpha, \gamma)}}. \quad (156)$$

Значения коэффициентов мощности в зависимости от угла регулирования при разных углах перекрытия для трех рассматриваемых нами кривых, подсчитанные по предыдущим трем формулам (154), (155), (156), представлены в виде кривых на фиг. 35, 36, 37. Как видно из этих кривых, наименьшие коэффициенты мощности получаются при схеме с двухфазной отсасывающей катушкой.

При соединении трансформатора в треугольник для схем без отсасывающей катушки и с трехфазной отсасывающей



Фиг. 35. Коэффициент мощности F_1 первичной обмотки трансформатора. $m=1$ в зависимости от углов α и γ .

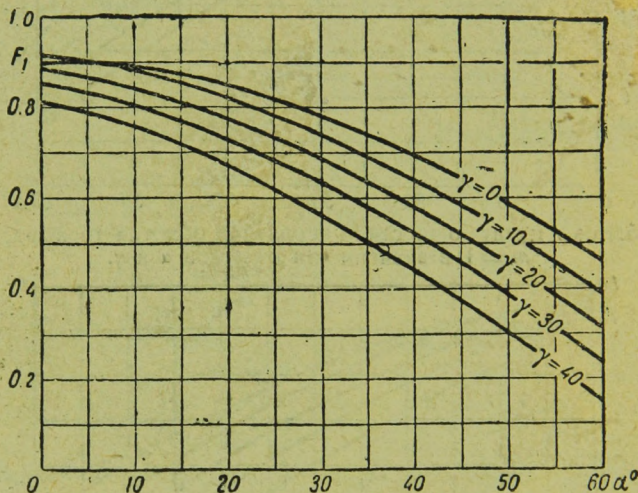


Фиг. 36. Коэффициент мощности F_1 первичной обмотки $m=2$ в зависимости от углов α и γ , а также коэффициент мощности F_1 при соединении первичной обмотки трансформатора в треугольник.

катушкой в линейных токах выпадают все гармоники, кратные трем.

Если разложить ток в первичной обмотке трансформатора в ряд, то он на основании формулы (130) может быть представлен в виде

$$I_{\text{перв}} = I_{\text{перв. акт}} \sqrt{\sum \left[\frac{\sin(km \cdot 30^\circ)}{k \sin(m \cdot 30^\circ)} \xi_k \alpha, \gamma \right]^2} = \\ = \sqrt{I_{k \neq 3n}^2 + I_{k \neq 3n}^2}$$



Фиг. 37. Коэффициент мощности F_1 первичной обмотки трансформатора $m=3$ в зависимости от углов α и γ .

Так как мы при рассмотрении электромагнитных процессов не принимаем во внимание потери в трансформаторе, то при одном и том же фазовом напряжении U_2 активная слагающая тока в первичной обмотке трансформатора будет при всех схемах иметь одно и то же значение. Коэффициенты $\frac{\sin(km \cdot 30^\circ)}{k \sin(m \cdot 30^\circ)}$ (см. таблицу на стр. 94) и $\xi_k \alpha, \gamma$ [формула (131)] имеют также одни и те же значения для гармоник одного и того же порядка. Поэтому, если для всех трех схем ток в первичной

обмотке трансформатора разбить на две части: на гармоники, кратные трем, и остальные слагающие, то эффективные значения последних слагающих $I_{k \neq 3n}$ будут для всех трех схем иметь одну и ту же величину.

Для схем с двухфазной катушкой ток в первичной обмотке трансформатора будет равен

$$I_{\text{перв } m=2} = \frac{P_{\text{ср}}}{3U_2 F_{m=2}},$$

для двух других схем

$$I_{\text{перв } m=1} = \frac{P_{\text{ср}}}{3U_2 F_{m=1}},$$

$$I_{\text{перв } m=3} = \frac{P_{\text{ср}}}{3U_2 F_{m=3}}.$$

Здесь $F_{m=1}$, $F_{m=2}$, $F_{m=3}$ — коэффициенты мощности первичной обмотки, величины которых даны формулами (154), (155) и (156).

Из этих соотношений следует, что доля эффективного значения всех составляющих тока в первичной обмотке трансформатора кроме третьих гармоник и доля эффективного режима третьих гармоник по отношению к полному току в первичной обмотке могут быть в зависимости от угла регулирования и угла перекрытия определены для схемы без отсасывающей катушки:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{I_{\text{перв } m=1}}{I_{\text{перв } m=2}} = \frac{F_{m=2}}{F_{m=1}} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{1-3\psi(\alpha, \gamma)}}{\sqrt{1-6\psi(\alpha, \gamma)}}} \end{aligned}$$

[см. формулы (154) и (156)],

$$q_1 = \sqrt{1-p_1^2}.$$

Для схемы с двухфазной катушкой

$$p_3 = \frac{I_{\text{пер}} I_{\text{пер}} m=3 F_{m=2}}{I_{\text{пер}} m=3 F_{m=3}} = \frac{2 \sqrt{2} \sqrt{1 - 3\phi(a, \gamma)}}{3 \sqrt{1 - 2\phi(a, \gamma)}}$$

и

$$q_3 = \sqrt{1 - p_3^2}.$$

Для схемы с двухфазной катушкой

$$p_2 = 1 \text{ и } q_2 = 0.$$

Подсчитанные по этим формулам коэффициенты p_1 , q_1 и p_3 , q_3 представлены на фиг. 33.

Так как при соединении в треугольник третьи гармоники выпадают, то линейный ток при соединении первичной обмотки в треугольник будет для всех трех схем иметь одно и то же значение

$$I_{\text{лин}} = I_{\text{пер}} \sqrt{3} \cdot p = \frac{P_{\text{ср}}}{3U_2 F_{m=2}}.$$

Значения $F_{m=2}$ в зависимости от a и γ приведены на фиг. 36.

Под влиянием высших гармоник в цепи постоянного тока коэффициент мощности будет ухудшаться. Это нужно учесть тем, что уменьшить коэффициент мощности в отношении

$$\left(1 + \frac{\varepsilon_{\text{кам}}}{2}\right) : 1,$$

т. е.

$$F = \frac{F_{m=2}}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{кам}}}{2}}.$$

Осталось учесть еще намагничивающий ток трансформатора. Соответствующее уменьшение коэффициента мощности на основании формулы (140) приведет к следующему его значению:

$$F' = \frac{F}{\sqrt{1 + 2F \frac{I_{\text{хол}}}{I_{\text{пер}}} \cos \varphi_0 + \frac{I_{\text{хол}}^2}{I_{\text{пер}}^2}}}.$$

33381
Что касается опытного определения коэффициента мощности, то оно встречает большие затруднения, так как обыкновенные измерительные приборы, точные при нормальной частоте, могут и не учитывать правильно высших гармоник. То же относится и к счетчикам энергии, правильно учитывающим энергию лишь при синусоидальных напряжениях и токах. Кроме того, если бы мы стали учитывать реактивную мощность соответствующим счетчиком реактивной мощности или делали бы измерения при помощи прибора для измерения $\cos \varphi$, то мы в результате получили бы не коэффициент мощности, а лишь косинус угла сдвига между напряжением и основной синусоидой линейного тока.

13566



Цена 1 р. 70 к.

ЭЭ — 35 — 5 — 4

103566